

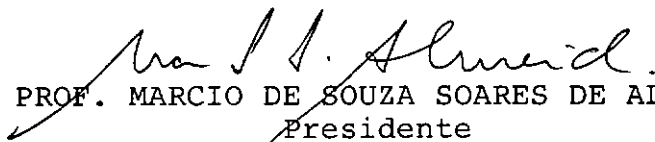
ANÁLISE DE RECALQUES DO ATERRO EXPERIMENTAL II SOBRE

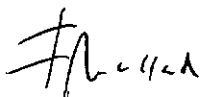
A ARGILA MOLE DE SARAPUÍ COM ELEMENTOS DRENANTES

BRANCA REGINA CANTISANO DOS SANTOS E SILVA RISCADO TERRA

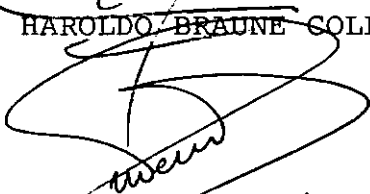
TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (M.Sc.) EM ENGENHARIA CIVIL.

APROVADA POR:


PROF. MARCIO DE SOUZA SOARES DE ALMEIDA
Presidente


PROF. FAIÇAL MASSAD


PROF. HAROLDO BRAUNE COLLET


PROF. MAURO LÚCIO GUEDES WERNECK


PROF. WILLY DE ALVARENGA LACERDA

Rio de Janeiro, RJ - Brasil

Abril - 1988

TERRA, BRANCA REGINA CANTISANO DOS SANTOS E SILVA RISCADO

ANÁLISE DE RECALQUES DO ATERRO EXPERIMENTAL II SOBRE
A ARGILA MOLE DE SARAPUÍ COM ELEMENTOS DRENANTES.

(Rio de Janeiro) 1988.

xvii, 239 p, 29.7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia
Civil, 1988).

Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

1 - Recalques

2 - Drenos Verticais

I - COPPE/UFRJ

II - Título (série)

AGRADECIMENTOS

- . Aos meus pais, irmãos, avós, tios e amigos pelos ensinamentos, incentivo e apoio.
- . Ao Professor Márcio de Souza Soares de Almeida, pela amizada, compreensão e ensinamentos.
- . Ao Professor Haroldo Braune Collet pela amizade e ensinamentos.
- . Aos professores Faiçal Massad e Mauro Lucio Guedes Werneck pela disponibilidade em participar da banca examinadora.
- . Ao professor Willy de Alvarenga Lacerda pelas sugestões apresentadas e disponibilidade em participar da banca examinadora.
- . Aos docentes e funcionários do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, área de Mecânica dos Solos, pelos ensinamentos e amizade.
- . A CAPES, pelo apoio financeiro.
- . Ao Instituto de Pesquisas Rodoviárias do DNER, responsável pelo projeto de alteamento dos Aterros Experimentais I e II, pelo apoio financeiro recebido durante a elaboração da tese.
- . A Eng^a Carmem Sylvia Menezes Ferreira, supervisora da pesquisa do Aterro Experimental II pelo incentivo.
- . Ao professor Wilton Bandeira de Mello pelos ensinamentos e amizade.

- . Ao professor Hermínio Zenobio da Costa pelo incentivo.
- . Ao professor Ian Schumann M. Martins pelas sugestões.
- . Aos colegas da COPPE pelo companheirismo.

- . Ao técnico em computação Eliézio Batista de Oliveira pelo apoio na área computacional da tese.

- . Ao estagiário José Antonio Azevedo Gomes pelo apoio.

- . A professora Sirlene Neuza Vicenzi pela amizade, compreensão e apoio.

- . A datilógrafa Eni Rosa dos Santos pela competente datilografia.

- . Aos desenhistas Ricardo S. Oliveira, Gilmar Sebastião Fernandes e Eduardo Luiz da Conceição, pela execução dos desenhos.

RESUMO DA TESE APRESENTADA À COPPE/UFRJ COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (M.Sc.)

ANÁLISE DE RECALQUES DO ATERRO EXPERIMENTAL II SOBRE A ARGILA MOLE DE SARAPUÍ COM ELEMENTOS DRENANTES

BRANCA REGINA CANTISANO DOS SANTOS E SILVA RISCADO TERRA

ABRIL DE 1988

ORIENTADOR: PROF. MARCIO DE SOUZA SOARES DE ALMEIDA

PROGRAMA: ENGENHARIA CIVIL

Este trabalho tem por objetivo calcular recalques finais e coeficientes de adensamento de campo a partir de recalques medidos em placas no eixo do Aterro Experimental II construído pelo IPR-DNER sobre a argila mole de SarapuÍ na Baía Fluminense. O Aterro II consistiu de sete seções instrumentadas sendo cinco delas com drenos verticais e duas delas sem drenos.

Para o cálculo de recalques finais e coeficientes de adensamento de campo foram utilizados os métodos de ASAOKA, ELLSTEIN, LONG e CAREY e TAN. Para os cálculos dos recalques finais foi também utilizado o método convencional a partir dos parâmetros obtidos de ensaios oedométricos.

O método de ASAOKA foi o que proporcionou melhores resultados de recalques e coeficientes de adensamento sendo os resultados desses últimos comparados com medições realizadas em ensaios de laboratório e ensaios "in situ". Foi feita uma avaliação preliminar da eficiência dos drenos concluindo-se que os drenos verticais não foram tão eficientes quanto esperados.

ABSTRACT OF THESIS PRESENTED TO COPPE/UFRJ AS PARCIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS OF THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE (M.Sc.)

ANALYSIS OF SETTLEMENTS OF THE "TRIAL EMBANKMENT II" ON THE SARAPUI'S SOFT CLAY WITH VERTICAL DRAINS.

BRANCA REGINA CANTISANO DOS SANTOS E SILVA RISCADO TERRA

APRIL, 1988

CHAIRMAN: PROF. MARCIO DE SOUZA SOARES DE ALMEIDA

DEPARTMENT: CIVIL ENGINEERING

The purpose of this dissertation is to back calculate final settlements and coefficients of consolidation under Trial Embankment II built by Brazilian Highway Research Institute on the Sarapui's soft clay at Fluminense Plains. This embankment has seven instrumented sections being five of them with vertical drains and the other two with no vertical drains.

The methods used for the calculation of final settlements and coefficients of consolidation were ASAOKA, ELLSTEIN, LONG e CAREY and TAN. For the calculation of the final settlement the conventional method was also used with parameters obtained from oedometer tests.

The ASAOKA's method was concluded to be one which produced better results of both settlements and coefficients of consolidation, the results of the latter being compared with values obtained from "in situ" and laboratory tests. A preliminary evaluation of the drain efficiency showed that vertical drains were not as efficient as expected.

LISTA DE SÍMBOLOS

SIMBOLOGIA LATINA

- A - largura de um dreno sintético
- a_1, a_2, \dots, a_n - variáveis que dependem do coeficiente de adensamento e das condições de contorno da argila no método de ASAOKA
- a_v - coeficiente de compressibilidade
- B - espessura de um dreno sintético.
- b_1 - dimensão relativa ao topo do aterro necessária ao cálculo do recalque imediato
- b_2 - dimensão relativa à base do aterro necessária ao cálculo do recalque imediato
- c - coeficiente de Carrillo
- \bar{c} - coesão efetiva
- c_h - coeficiente de adensamento horizontal
- c_v - coeficiente de adensamento vertical
- $c_{v,h}$ - coeficiente de adensamento combinado
- C_c - índice de compressão virgem
- C_r - índice de recompressão
- D - parâmetro referente ao cálculo do "efeito da submersão apresentado por SANDRONI [1].
- d_e - diâmetro de influência de um dreno
- d_w - diâmetro efetivo de um dreno de areia ou diâmetro equivalente de um dreno pré-fabricado
- E_u - módulo de Young ou módulo de elasticidade não drenado
- e - índice de vazios
- e_1 - índice de vazios inicial

- e_2 - índice de vazios final
 $\exp = e$ - base dos logarítmos naturais ou neperianos
 $f(n)$ - função relativa ao diâmetro de influência de um dreno e ao diâmetro efetivo de um dreno de areia ou diâmetro equivalente de um dreno pré-fabricado.
 G - módulo cisalhante e densidade dos grãos
 h - altura do aterro
 h' - espessura da camada de argila descontado o recalque final por adensamento da fase anterior ao carregamento considerado
 h_a - espessura da subcamada de argila proveniente da divisão da camada de argila
 $2H$ - espessura da camada de argila
 H_d - espessura da camada de argila onde ocorre o processo de adensamento dividida pelo número de superfícies drenantes
 i - subcamada genérica da camada de argila
 IP - índice de plasticidade
 J_0 - função de Bessel de primeira classe, ordem zero
 J_1 - função de Bessel de primeira classe, primeira ordem
 k_v - coeficiente de permeabilidade vertical
 k_h - coeficiente de permeabilidade horizontal
 LL - limite de liquidez
 LP - limite de plasticidade
 m_v - módulo de compressibilidade volumétrica
 m - número inteiro
 M - função de m e π
 n - inteiro ou número de subcamadas proveniente da divisão da camada de argila ou razão entre o diâmetro de influência ou raio de influência de um dreno e o diâmetro

efetivo ou raio efetivo de um dreno de areia (ou diâmetro equivalente ou raio equivalente de um dreno pré-fabricado)

- p - sobrecarga devido ao peso próprio do aterro
- r - localização ou abcissa de um ponto ao longo de r_e
- r_e - raio da influência de um dreno de areia ou raio equivalente de um dreno pré-fabricado
- r_w - raio efetivo de um dreno de areia ou raio equivalente de um dreno pré-fabricado
- r_1 - coeficiente necessário ao cálculo do recalque inicial referente a $2H/b$
- r_2 - coeficiente necessário ao cálculo do recalque inicial referente à $2H/b$
- s - fator de amolgamento
- s - espaçamento entre drenos
- $s(t)$ - recalque por adensamento em um tempo t
- $s(t)_n$ - recalque por adensamento em um tempo $t = n$
- $s(t)_{n+1}$ - recalque por adensamento em um tempo $t = n+1$
- s_o - recalque imediato
- $s(\infty)$ - recalque final por adensamento
- $s'(\infty)$ - recalque final por adensamento sem consideração do efeito da submersão
- $s(t_1), s(t_2)$ - recalque por adensamento em tempos t e t , respectivamente
- s_t - recalque total em um tempo t
- s_f - recalque final
- s_{sec} - recalque secundário
- $s_{f_{sec}}$ - recalque final somado ao recalque secundário
- S_u - resistência não drenada
- t - tempo
- t_o - tempo de início de aplicação do carregamento

T_h	-	fator tempo horizontal
T_v	-	fator tempo vertical
$T_{v,h}$	-	fator tempo combinado
U_h	-	grau de adensamento médio horizontal
U_v	-	grau de adensamento médio vertical
$U_{v,h}$	-	grau de adensamento médio combinado
U_z	-	grau de adensamento para qualquer ponto da massa de solo
u	-	excesso de poro-pressão em um dado tempo t
u_i	-	excesso de poro-pressão inicial
\bar{u}	-	função de u_i , $f(n)$ e T_h
u_r	-	excesso de poro-pressão em um ponto de abcissa r , em um dado tempo t , devido ao fluxo horizontal.
\bar{u}_r	-	excesso de poro-pressão média, na posição r , em um dado tempo t , devido ao fluxo horizontal, ao longo da massa de solo
w	-	umidade natural
y_0	-	função de Bessel de segunda classe, ordem zero
y_1	-	função de Bessel de segunda classe, primeira ordem
z	-	distância medida da superfície da camada de argila até um ponto considerado.

SIMBOLOGIA GREGA

- α - coeficiente de forma de um dreno sintético
 $\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3$ - raízes das funções de Bessel
 α - coeficiente linear da reta $\frac{t}{s_t} = \alpha + t\beta$ do método de TAN
 $\bar{\alpha}$ - parâmetro relativo à distribuição de pressões devido ao carregamento ao longo da camada de argila
 $tg\alpha$ - inclinação da reta $y(t) = a + tg\alpha t$ do método de LONG e CAREY
 β_1 - inclinação da reta obtida no gráfico $s(t)_{n+1} \times s(t)_n$ do método de ASAOKA modificado por MAGNAN e DEROT
 β - inclinação da reta $\frac{t}{s_t} = \alpha + \beta t$ do método de TAN
 $\bar{\beta}$ - parâmetro relativo à distribuição de pressões devido ao carregamento ao longo da camada de argila
 γ - peso específico total
 γ_{aterro} - peso específico do aterro acima do nível d'água
 $\gamma_{\text{aterro, sub}}$ - peso específico submerso do aterro
 γ_w - peso específico da água
 Δt - espaçamento arbitrário entre os pontos da curva de recalque ao longo do tempo
 $\Delta\bar{\sigma}_v$ - variação da tensão efetiva vertical
 $\Delta\sigma_v$ - variação da tensão vertical total
 ΔS_u - variação da resistência não drenada
 ϵ_v - deformação volumétrica vertical
 ν_u - coeficiente de Poisson não drenado
 $\bar{\sigma}_{v0}$ - tensão efetiva "in situ"
 $\bar{\sigma}_v$ - tensão efetiva vertical
 $\bar{\sigma}_{v1}$ - tensão efetiva vertical inicial de uma amostra de solo
 $\bar{\sigma}_{v2}$ - tensão efetiva vertical final de uma amostra de solo

- σ_z - pressão devido ao carregamento na profundidade z da camada de argila
- $\bar{\sigma}_{vm}$ - tensão de pré-adensamento
- π - número 3,1416...
- $\bar{\phi}$ - ângulo de resistência ao cisalhamento efetivo
- θ - ângulo que a reta $\frac{t}{s_t} = \alpha + \beta t$ faz com a horizontal no método de TAN

ÍNDICE

Pag.

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	
I.1. Aterros sobre Drenos Verticais	
I.2. Aterros Experimentais	
I.3. Objetivos da Dissertação e sua Organização	
CAPÍTULO II - DESCRIÇÃO DO ATERRO EXPERIMENTAL II	
II.1. Introdução	
II.2. Resumo das propriedades Geotécnicas da "Argila Cinza do Rio de Janeiro"	
II.3. Geometria e Tipos de Drenos do Aterro Experimental II	
II.4. Instrumentação do Aterro Experimental II para Medições de Recalque	
CAPÍTULO III - DESCRIÇÃO DAS TEORIAS APLICADAS À ANÁLISE DE RECALQUES E COEFICIENTES DE ADENSAMENTO..	
III.1. Introdução	
III.2. Nomenclatura de Recalques	
III.2.1. Recalques Iniciais	
III.3. Solução Clássica de Terzaghi	
III.3.1. Introdução	
III.3.2. Fundamentos Teóricos	
III.4. Solução de Barron	
III.4.1. Introdução	
III.4.2. Fundamentos Teóricos	
III.4.2.1. Geometria de instalação de drenos de areia	
III.4.2.2. Adensamento radial e vertical	
III.4.2.3. Deformações verticais livres sem efeito "smear" e sem influência da resistência do dreno	
III.4.2.4. Deformações verticais iguais sem efeito "smear" e sem influência da resistência do dreno	
III.5. Método de ELLSTEIN	
III.5.1. Introdução	
III.5.2. Fundamentos Teóricos.....	
III.5.3. Procedimento Utilizado para os Cálculos	

III.5.4.	Considerações sobre o Método	
III.6.	Método de LONG e CAREY	
III.6.1.	Introdução	
III.6.2.	Fundamentos Teóricos	
III.6.3.	Procedimento Utilizado para os Cálculos.....	
III.6.4.	Considerações sobre o Método	
III.7.	Método de TAN	
III.7.1.	Introdução	
III.7.2.	Fundamentos Teóricos	
III.7.3.	Procedimento Utilizados para os Cálculos....	
III.7.4.	Considerações sobre o Método.....	
III.8.	Método de ASAOKA Modificado por MAGNAN e DEROY	
III.8.1.	Introdução	
III.8.2.	Fundamentais Teóricos	
III.8.3.	Procedimento utilizado para os Cálculos	
III.8.4.	Considerações sobre o Método	
III.9.	Teoria Convencional para o Cálculo de Recalques Finais por Adensamento	
III.9.1.	Introdução	
III.9.2.	Procedimento Utilizado para os Cálculos	
III.9.3.	Consideração do Efeito da Submersão do Aterro no Cálculo dos Recalques Finais	
III.10.	Comentários Finais	
III.10.1.	Métodos Apresentados	
III.10.2.	Outros Métodos Existentes	
CAPÍTULO IV	APLICAÇÃO DAS TEORIAS DE CÁLCULO DE RECAL- QUES E DE COEFICIENTES DE ADENSAMENTO	
IV.1.	Introdução	
IV.2.	Dados necessários à Análise	
IV.3.	Considerações Gerais sobre a Análise	
IV.4.	Cálculo do Recalque Inicial	
IV.5.	Cálculo de Coeficientes de Adensamento e Recalques Finais por Adensamento pelo Método de ELSSTEIN	
IV.6.	Cálculo dos Coeficientes de Adensamento e Recalques Finais pelo Método de LONG e CAREY	
IV.7.	Cálculo dos Recalques Finais pelo Método de TAN	
IV.8.	Cálculo dos Recalques Finais e Coeficientes de Adensamento pelo Método de ASAOKA Modificado por MAGNAN e DEROY	
IV.8.1.	Influência do Intervalo de tempo Δt	
IV.9.	Método Convencional de Recalques Finais por Aden- samento	

IV.10. Resumo e Comentários Finais	
IV.10.1. Variações de c_v e c_h com o tempo	
IV.10.2. Valores médios de c_v e c_h dos Métodos de ELLSTEIN e LONG e CAREY	
CAPÍTULO V - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	
V.1. Introdução	
V.2. Discussão dos Resultados de Recalques Finais	
V.3. Discussão dos Resultados de Coeficientes de Aden- samento	
V.3.1. Valores de c_v e c_h calculados com dados de até 6 meses após o carregamento	
V.3.2. Valores de c_v e c_h calculados com todos os dados	
V.3.3. Curvas de grau de adensamento-tempo, teóricas e medidas	
V.3.3.1. Discussão das curvas de grau de adensamento medidas	
V.3.4. Comparação com valores obtidos através de <u>en</u> saio de laboratório	
V.3.5. Comparação com valores obtidos através de <u>en</u> saio "in situ" do tipo piezocone.....	
V.3.6. Avaliação final dos valores de c_v e c_h	
V.4. Comparação de recalques previstos com dados de até 6 meses (método de ASAOKA) com recalques medi- dos	
V.5. Avaliação preliminar da eficiência dos drenos	
V.5.1. Fatores que influenciam na eficiência dos drenos	
V.5.2. Possível amolgamento causado pela execução dos drenos	
V.5.3. Velocidades de Recalque das Seções do Aterro II..	
CAPÍTULO VI - CONCLUSÕES E SUGESTÕES	
VI.1. Introdução	
VI.2. Conclusões	
VI.2.1. Recalques Finais	
VI.2.2. Coeficientes de Adensamento	
VI.2.3. Eficiência dos drenos	
VI.3. Sugestões para Pesquisas Futuras	
VI.3.1. Estudos Analíticos.....	
VI.3.2. Estudos Experimentais	

APÊNDICE A	
APÊNDICE B	
APÊNDICE C	
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

I.1. ATERROS SOBRE DRENOS VERTICAIS

São vários os métodos construtivos utilizados para aterros sobre solos moles. A construção de aterros sobre drenos verticais para a aceleração de recalques é um dos métodos mais utilizados e o principal objetivo é o de liberar a obra para uso em menor tempo com recalques adicionais toleráveis. Este método é muitas vezes aplicado em conjunto com as técnicas de carregamento em estágios ou de colocação de sobrecarga.

Entretanto, apesar da técnica acima ser muito aplicada, ainda permanecem dúvidas quanto à eficácia de drenos verticais executados em depósitos argilosos muito moles e/ou sensíveis, tendo em vista a possível influência nefasta que a cravação de drenos pode ter nos tipos de solos acima.

As duas categorias básicas de drenos verticais utilizados são os drenos de areia e os drenos sintéticos. Em cada uma dessas categorias existem vários tipos de drenos, executados das formas mais diversas e induzindo a diferentes graus de amolgamento no solo. Assim, torna-se importante investigar a eficiência dos principais tipos de drenos utilizados.

I.2. ATERROS EXPERIMENTAIS

Com o objetivo de investigar os pontos levanta

dos acima tem-se construído aterros experimentais instrumentados em diversos países. Alguns desses aterros têm sido observados por mais de 40 anos como é o caso dos aterros de Ska Edeby, na Suécia (HOLTZ e BROMS,^[24]). Uma revisão exaustiva dos diversos aterros experimentais sobre drenos verticais descritos na literatura foi apresentada por MAGNAN^[30].

Como parte da pesquisa de Aterros sobre Solos Compressíveis o Instituto de Pesquisas Rodoviárias, IPR-DNER iniciou em 1981 a construção do Aterro Experimental II sobre diversos tipos de elementos drenantes. Os objetivos básicos deste trabalho de pesquisa são: a) testar a eficácia de drenos verticais para a aceleração de recalques na "argila cinza do Rio de Janeiro"; b) investigar a eficiência de diversos tipos de drenos verticais; c) avaliar os diversos métodos de ensaios de solos utilizados para a obtenção de parâmetros de compressibilidade e de adensamento; d) indicar metodologias de projeto e de acompanhamento construtivo para aterros sobre drenos verticais.

1.3. OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO E SUA ORGANIZAÇÃO

O objetivo desta dissertação é efetuar uma análise dos recalques medidos na base do aterro e a partir dessa análise estimar valores de coeficientes de adensamento e de recalques finais. Com esta análise uma resposta preliminar aos itens a) à d) acima deverá ser obtida. Entretanto, apenas após as análises de poro pressões e de deslocamentos horizontais poderão ser obtidas conclusões mais definitivas sobre o comporta

mento do aterro e dos drenos.

O Capítulo II apresenta uma descrição do Aterro Experimental II, sua localização, um resumo das propriedades geotécnicas da "argila cinza do Rio de Janeiro", a geometria e tipos de drenos utilizados, as fases do carregamento e a instrumentação para medições de recalque colocadas no aterro.

O Capítulo III descreve com detalhe as diversas teorias aplicadas à análise de recalques para o cálculo dos recalques finais e dos coeficientes de adensamento.

O Capítulo IV apresenta os dados necessários às análises e os valores obtidos de recalques finais e de coeficientes de adensamento.

A discussão dos resultados obtidos é apresentada no Capítulo V e a conclusão do trabalho no Capítulo VI.

Além disso, o presente trabalho apresenta no Apêndice A as curvas recalque-tempo instaladas no Aterro Experimental II; no Apêndice B uma descrição sussinta do "Programa SARA-PUÍ" e finalmente, no Apêndice C a descrição e uma listagem do "Programa ASAOKA".

CAPÍTULO II

DESCRIÇÃO DO ATERRO EXPERIMENTAL II

II.1. INTRODUÇÃO

O Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), patrocinou a construção de dois aterros experimentais e executou uma escavação experimental, para fins de pesquisa, no depósito de argila mole, situado no Rio de Janeiro, Baixada Fluminense, "Área Experimental de Sarapuí", km 116,5 da BR-040 (Rio - Petrópolis), como mostra a figura (II.1).

Esta pesquisa contou com a colaboração de professores e técnicos da Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro e da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Neste Capítulo será apresentado um resumo das propriedades geotécnicas da argila mole, denominada "argila cinza do Rio de Janeiro", "argila de Sarapuí" ou "argila mole da Baixada Fluminense"; a geometria, os tipos de elementos drenantes e a instrumentação utilizada na medição dos recalques do Aterro Experimental II.

II.2. RESUMO DAS PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS DA "ARGILA CINZA DO RIO DE JANEIRO"

O depósito da "argila cinza do Rio de Janeiro", na

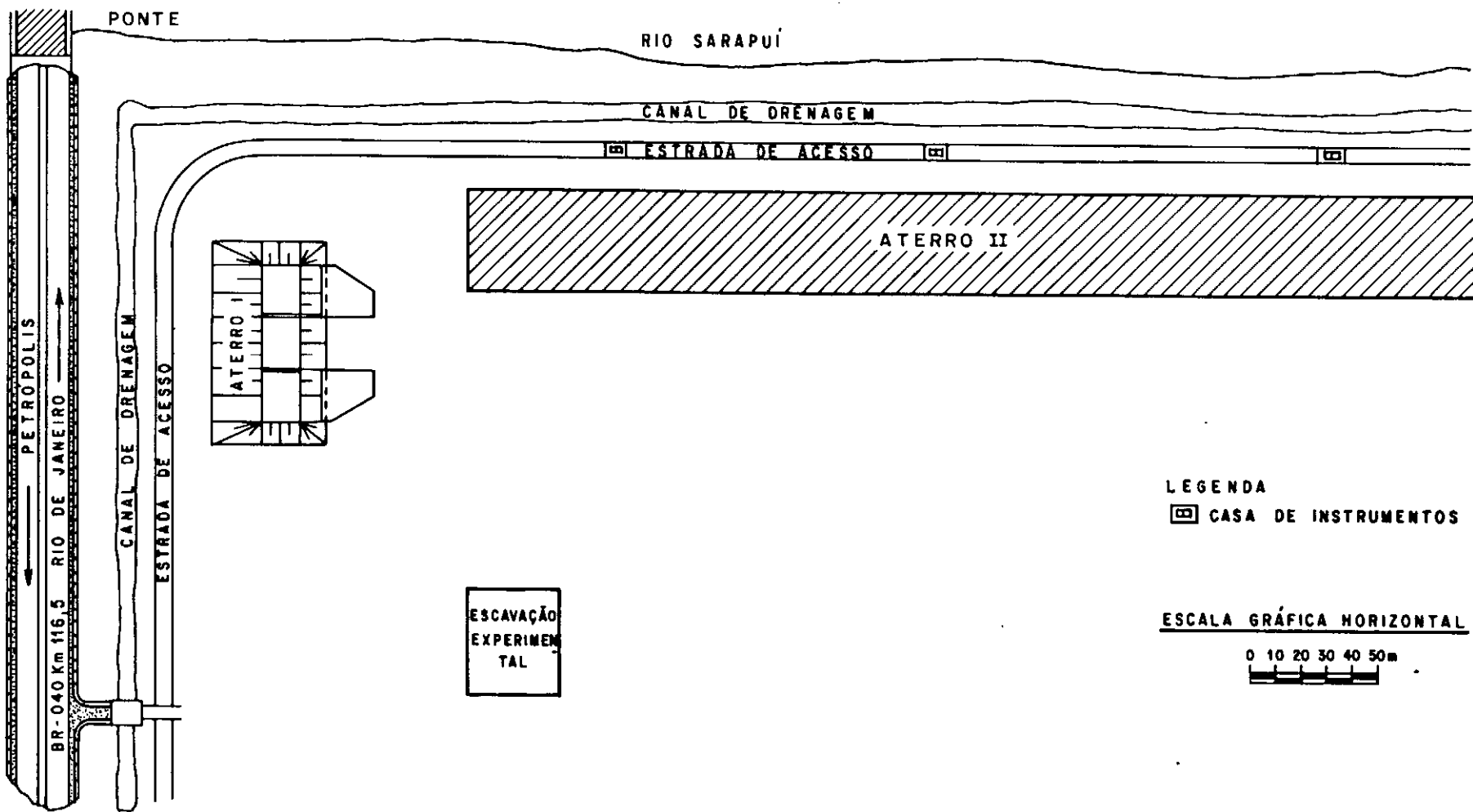


Figura II - 1 - Localização do Aterro Experimental II

área experimental, tem espessura de aproximadamente 10,0m sobrejacente à uma camada arenosa.

O material argiloso consiste em um sedimento flúvio-marinho, com teor de matéria orgânica variando de 4,0 a 6,5%, considerado recente do ponto de vista geológico (6000 à 10000 anos). O principal argilo-mineral presente é a caulinita, possuindo ainda a illita e a montmorilonita, segundo COSTA FILHO e outros^[12].

O resumo das propriedades geotécnicas da argila, na região do Aterro Experimental II, é apresentado a seguir:

(a) Índices Físicos

Os resultados dos ensaios de limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e umidade natural (w), sem secagem ao ar, com índice de plasticidade (IP) entre 80% e 90% e valores de umidade um pouco superior ao limite de liquidez, segundo ORTIGÃO^[36], estão apresentados na figura (II.2.(a)).

Os resultados dos ensaios para determinação da densidade dos grãos, de acordo com COSTA FILHO e outros^[12], apresentam valor médio de 2,61.

O valor da percentagem de partículas com diâmetro menor que 0,002mm (percentagem de finos), segundo resultados de COSTA FILHO e outros^[12] é de 59%.

(b) História de Tensões

Os resultados dos ensaios oedométricos realizados por ORTIGÃO^[36] para determinação da história de tensões da argi

la, representada através das tensões efetivas "in situ" ($\bar{\sigma}_{vo}$) e da tensão de pré-adensamento ($\bar{\sigma}_{vm}$) são mostrados na figura (II.2.(b)).

As principais causas do pré-adensamento da argila são: o efeito de envelhecimento ("aging"), ressecamento da camada superficial e variação do nível d'água freático, sendo que o último e o primeiro fator devem ser os preponderantes (ALMEIDA^[1]).

(c) Resistência não Drenada

Os resultados dos ensaios de palheta de campo, com equipamento dotado de sapata protetora (isento de atrito), segundo ORTIGÃO e COLLET^[37] são apresentados na figura (II.2.(c)). O valor médio da resistência não drenada (S_u) varia de 8 kPa à 18 kPa.

(d) Parâmetros de Resistência

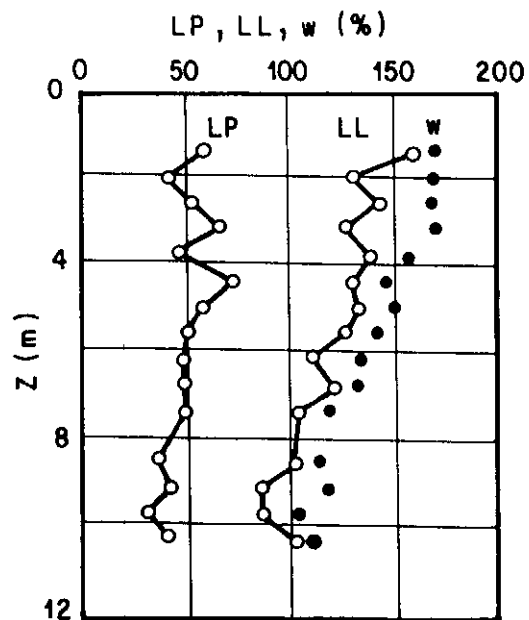
Os parâmetros efetivos da resistência obtidos através de diversos ensaios triaxiais segundo GERSCOVICH e outros^[20] e ORTIGÃO^[36] indicam os seguintes resultados:

- a) para amostras retiradas da camada superior da argila (profundidade < 2,0m)

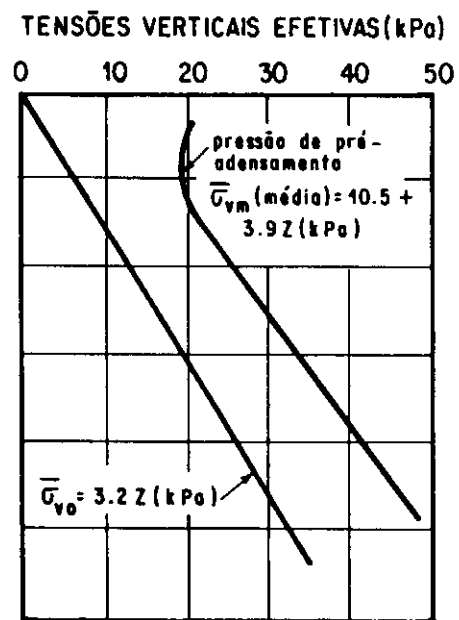
$$\bar{c} = 15 \text{ kpa}$$

$$\bar{\phi} = 30^\circ$$

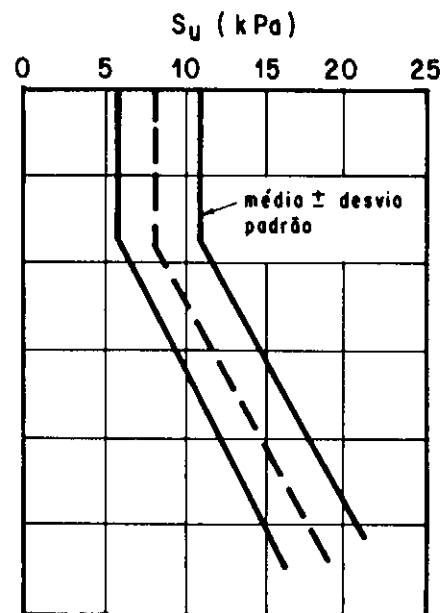
- b) para amostras retiradas da camada subjacente da argila (profundidade > 2,0m)



(a)



(b)



(c)

Figura 11-2 - Propriedades Geotécnicas da Argila do Rio de Janeiro

$$\bar{c} = 0$$

$$\bar{\phi} = 25^\circ$$

(e) Parâmetros de compressibilidade e de adensamento

Os valores dos índices de compressão virgem e índice de recompressão, obtidos em ensaios realizados por ORTIGÃO^[36] variam de $C_c = 2,13$ até 4,0m de profundidade à $C_c = 1,53$ à 10,0m de profundidade e $C_r = 0,37$ à 4,0m de profundidade de $C_r = 0,34$ à 10,0m de profundidade.

Os valores do coeficiente de adensamento horizontal (c_h) e vertical (c_v), obtidos em ensaios com drenagem radial e vertical, respectivamente, realizados por COUTINHO e LACERDA^[14] estão apresentados na figura (II.3).

O valor médio do módulo de compressibilidade volumétrica (m_v), segundo COUTINHO^[13] é de $m_v = 0,003 \text{ m}^2/\text{KN}$.

II.3. GEOMETRIA E TIPOS DE DRENOS DO ATERRO EXPERIMENTAL II

O Aterro Experimental II apresenta as seguintes dimensões nominais: comprimento de 330,0m e largura de 40,0m. Ao longo do eixo longitudinal, o aterro foi dividido em sete seções (A até G), apresentando, cada uma delas, as características indi cadas na tabela (II.1).

O processo construtivo dos drenos de areia, executados no Aterro Experimental II, consiste basicamente na abertura de furos verticais através de máquina para execução de estacas tipo Franki (drenos tipo ponta fechada e ponta aberta) e a

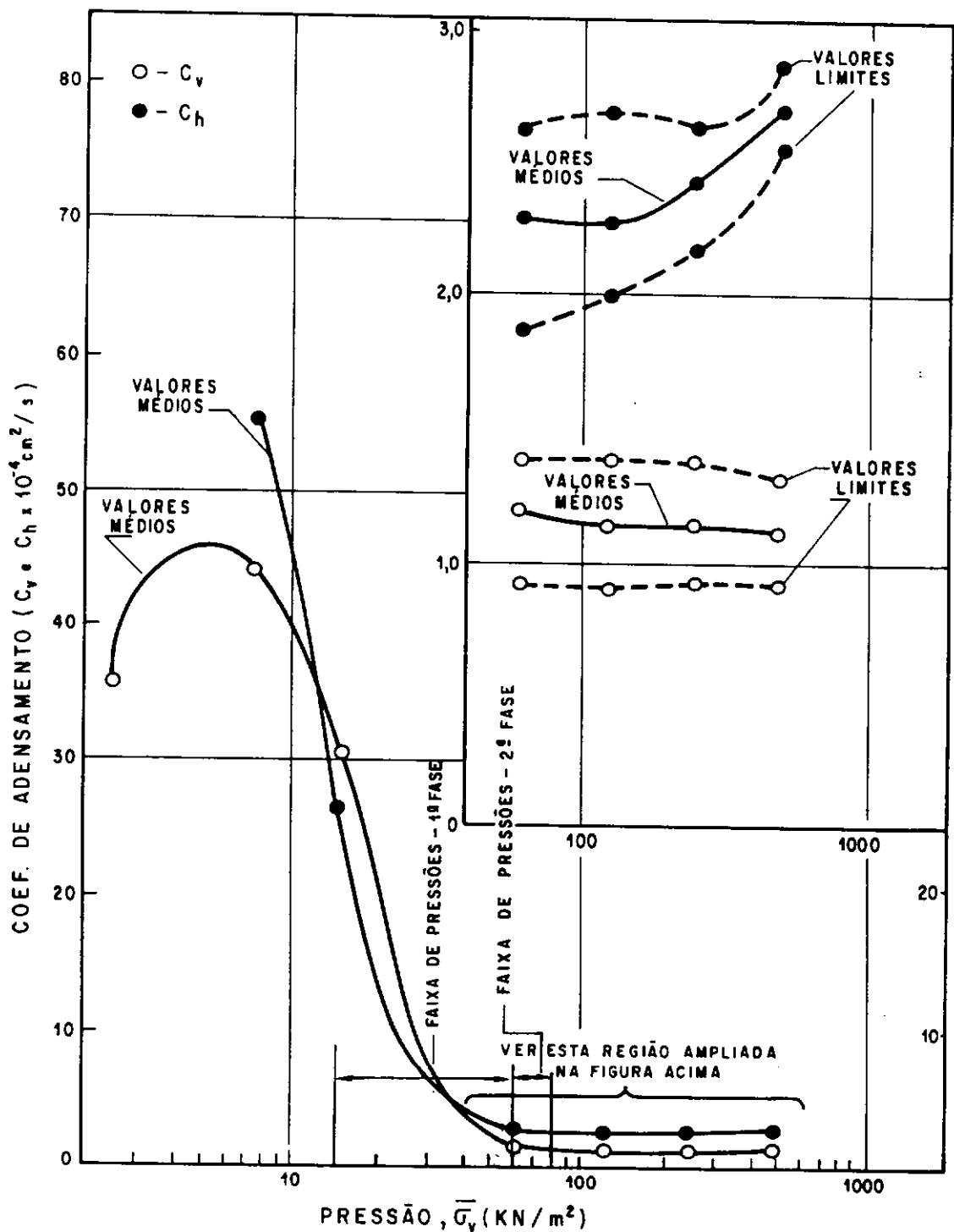


Figura 11-3 - Variação de c_v e c_h com a pressão efetiva \bar{G}_v .
 Valores determinados em laboratório (APUD COUTINHO e LACERDA [14]).
 Faixas de valores de campo.

TABELA II.1. CARACTERÍSTICAS DAS SEÇÕES DO ATERRO EXPERIMENTAL II

Carac- terísticas SEÇÃO	TIPO DE COLCHÃO DRENANTE	ESPESSURA DO COLCHÃO (m)	TIPO DE DRENO	DIÂMETRO EFETIVO DO DRE- NO DE AREIA OU DIÂMETRO EQUIVALENTE DO DRENO PRÉ- FABRICADO (m)	ESPAÇAMEN- TO ENTRE DRENOS (m)	TIPO DE MALHA	NÚMERO DE DRENOS
A	Manta Geo- textil (Bi- dim OP-60)	$4,5 \times 10^{-3}$	-	-	-	-	-
B	Areia	0,41	Areia Ponta-Fecha- da	0,40	2,50	QUADRADA	216
C	Areia	0,32	Areia Ponta-Aber- ta	0,40	2,50	QUADRADA	168
D	Areia	0,31	Areia Jato d'água	0,40	2,50	QUADRADA	168
E	Areia	0,43	Pré-fabrica- do Fibro- Químico	$5,0 \times 10^{-2}$	1,70	QUADRADA	320
F	Areia	0,39	Pré-fabrica- do Geotextil (Bidim OP-60)	$10,0 \times 10^{-2}$	2,00	QUADRADA	322
G	Areia	0,34	-	-	-	-	-

través de guindastes com tubo para furação e dispositivo para jateamento sob pressão acoplados (dreno tipo jato d'água) e posterior preenchimento dos mesmos com areia.

Os drenos sintéticos fibro-químicos são constituídos de um corpo drenante de 10 cm de largura e $2,8 \times 10^{-1}$ cm de espessura, com núcleo de polietileno e fibra sintética e foram executados por cravação estática através de máquina para cravação de drenos. Os drenos sintéticos de geotextil são constituídos de uma fita de BIDIM OP-60 com 21 cm de largura e $4,5 \times 10^{-1}$ cm de espessura e foram executados por cravação dinâmica através de guindaste com vibrador acoplado. Maiores detalhes sobre os procedimentos de execução dos drenos acima descritos estão no trabalho de COLLET^[10].

Com relação a equivalência de um dreno sintético com um dreno de areia, KJELLMAN^[26] diz que a eficiência dos drenos verticais depende, em grande parte, do perímetro da sua seção transversal e muito pouco de sua área. Assim, um dreno de areia de diâmetro d_w onde o perímetro de sua seção transversal é πd_w corresponde a um dreno sintético de largura A e espessura B em que o perímetro da seção transversal é $(2A + 2B)$, assim foi determinado que:

$$\pi d_w = (2A + 2B) \quad (\text{II.3.1})$$

onde d_w = diâmetro equivalente do dreno sintético.

Segundo MAGNAN^[30], é razoável dimensionar os drenos pré-fabricados de 10 cm de largura como equivalente a drenos de areia de 5 cm de diâmetro, desprezando-se as possíveis diferenças de permeabilidade longitudinal e transversal dos drenos

de diversos tipos de material e que, para larguras maiores, não se dispõe, no estágio atual de conhecimento, de regras satisfatórias para dimensionamento de projetos.

No projeto trabalho, por recomendações do fabricante do dreno fibro-químico AOKI-MORUMBI S.A.^[4], aplicou-se um coeficiente de forma igual à 0,75. Dessa forma, a equação (II.3.1), é expressa por:

$$d_w = (2A + 2B) \quad (\text{II.3.2})$$

$$\text{logo} \quad d_w = (2A + 2B) \cdot 0,75 \quad (\text{II.3.3})$$

O mesmo critério foi adotado para o dreno geotextil.

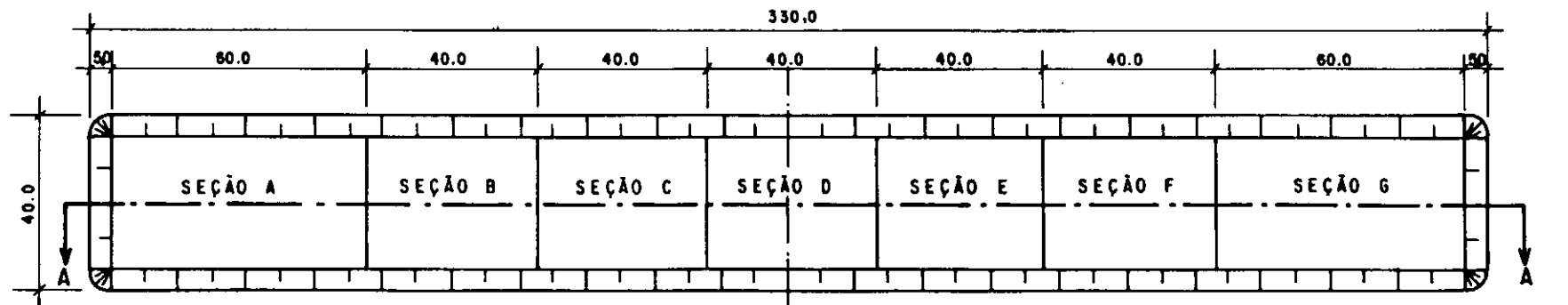
Com a finalidade de uma análise mais detalhada foram também realizados cálculos na seção D com valores de diâmetro de 50 e 60 cm e nas seções E e F com valor de $\gamma = 0,5$.

A seção longitudinal de projeto do Aterro Experimental II é mostrada esquematicamente, na figura (II.4).

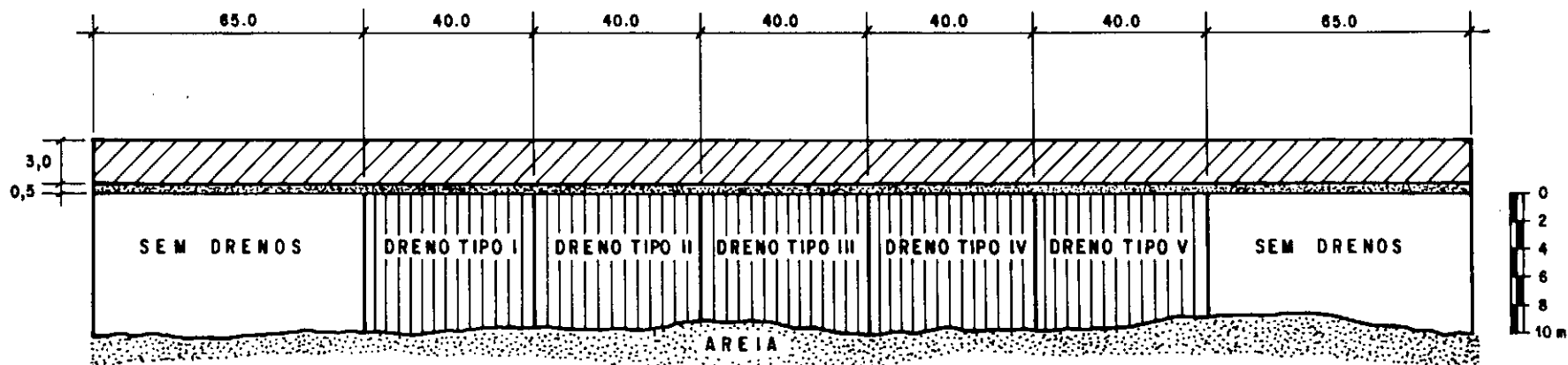
A construção do Aterro Experimental II obedeceu ao seguinte procedimento:

- 1ª fase de construção:

. 1ª fase de carregamento: construção de colchão de areia, de peso específico médio de $20,2 \text{ KN/m}^3$, nas seções indicadas na tabela (II.1), de altura aproximada de 0,50m e a seguir, deposição de material de jazida (areia siltosa com peso



PLANTA BAIXA



CORTE AA

TIPO DE DRENO	DENOMINAÇÃO
I	AREIA PONTA FECHADA
II	AREIA PONTA ABERTA
III	AREIA JATO D'ÁGUA
IV	FIBRO - QUÍMICO
V	GEOTEXTIL (BIDIM)

ESCALA GRÁFICA HORIZONTAL

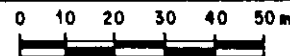


Figura II - 4. Planta e Corte Longitudinal Projetados Para o Aterro Experimental II

específico médio de $19,7 \text{ KN/m}^3$) até a altura aproximada de $1,0\text{m}$.

- . 2ª etapa de carregamento: deposição de material de jazida (areia siltosa com peso específico médio de $19,5 \text{ KN/m}^3$) até a altura aproximada de $2,0\text{m}$.

- 2ª fase de construção:

- . 3ª etapa de carregamento: deposição de material de jazida (areia siltosa com peso específico médio de $15,8 \text{ KN/m}^3$) até a altura aproximada de $3,5\text{m}$.

Considerou-se a 1ª fase de construção englobando as 1ª e 2ª etapas de carregamento porque a previsão inicial de projeto era elevar o aterro, em uma etapa única, até a altura de $2,5\text{m}$, porém, como ocorreu interrupção dos serviços por um período de mais de 200 dias, o alteamento dividiu-se em uma 1ª etapa atingindo a altura aproximada de $1,0\text{m}$ e em uma 2ª etapa, alcançando a altura prevista, de aproximadamente $2,0\text{m}$.

As figuras II.5 à II.7 mostram, esquematicamente a variação da altura do aterro com o tempo para as diversas seções. A seção transversal projetada do Aterro Experimental II está apresentada na figura (II.8).

No presente trabalho, o cálculo de recalques e coeficientes de adensamento foi realizado separadamente, ou seja, para cada fase de carregamento de forma isolada, assim, o tempo t_o

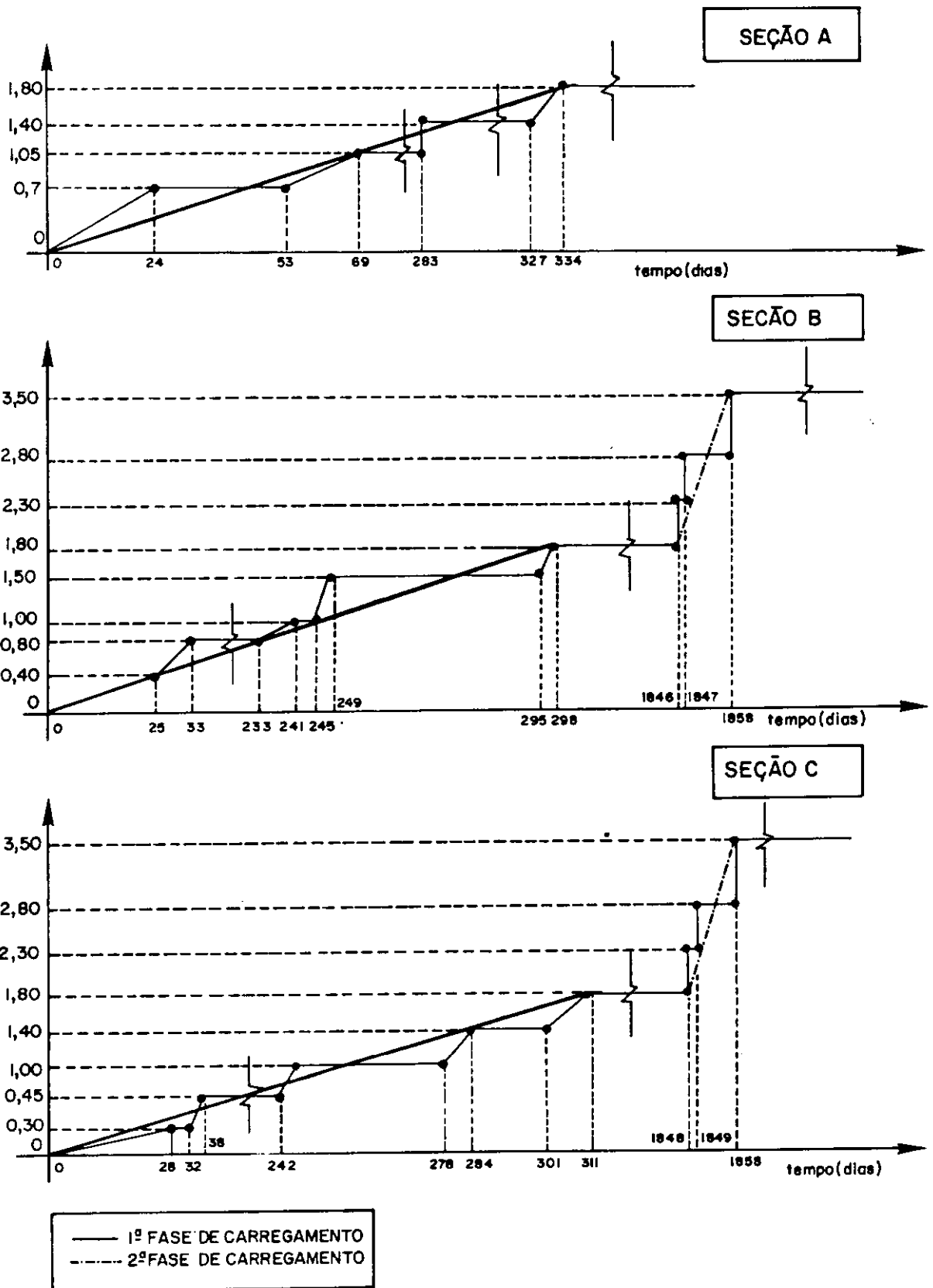


Figura II.5 - Variação de altura do Aterro Experimental II em função do tempo.

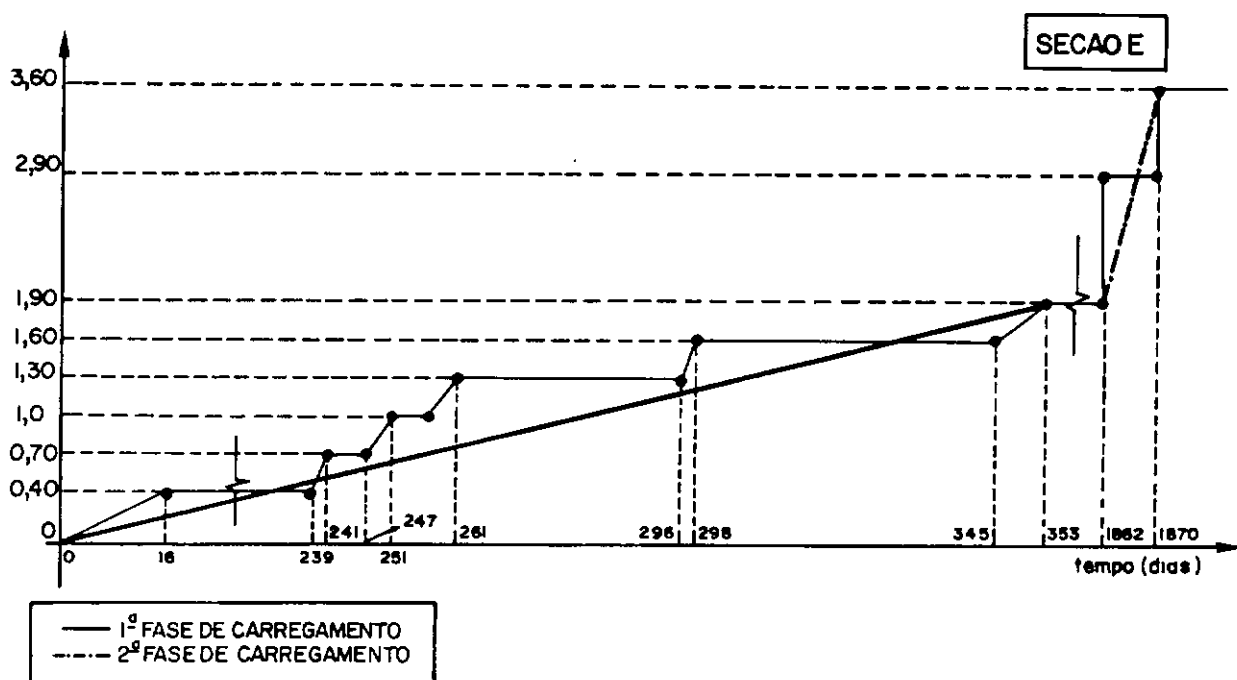
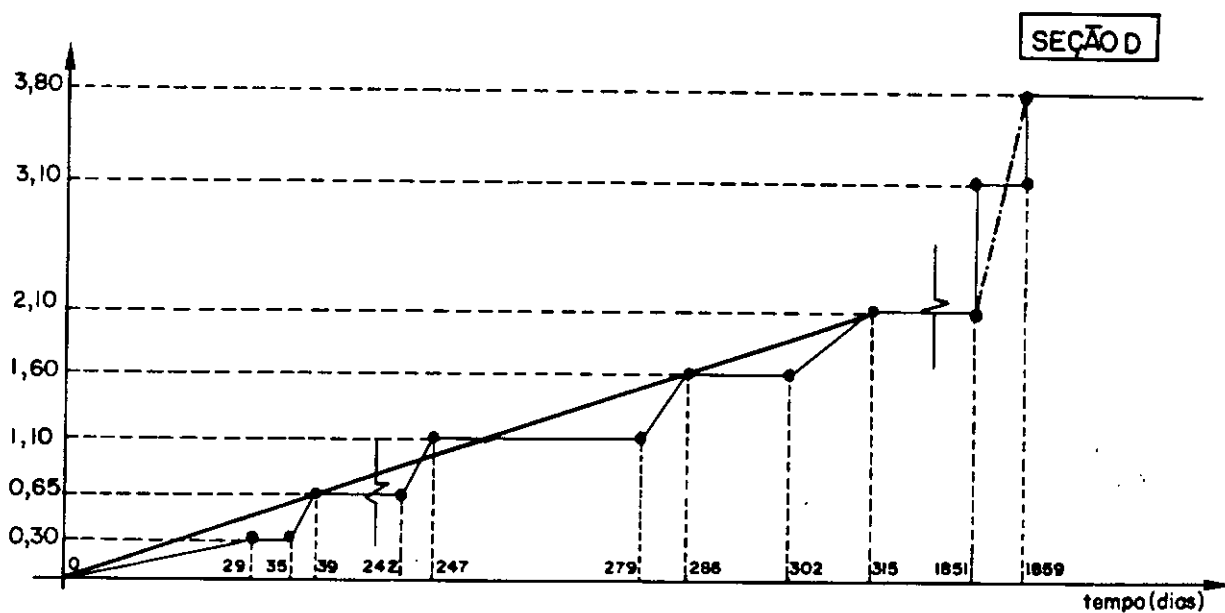
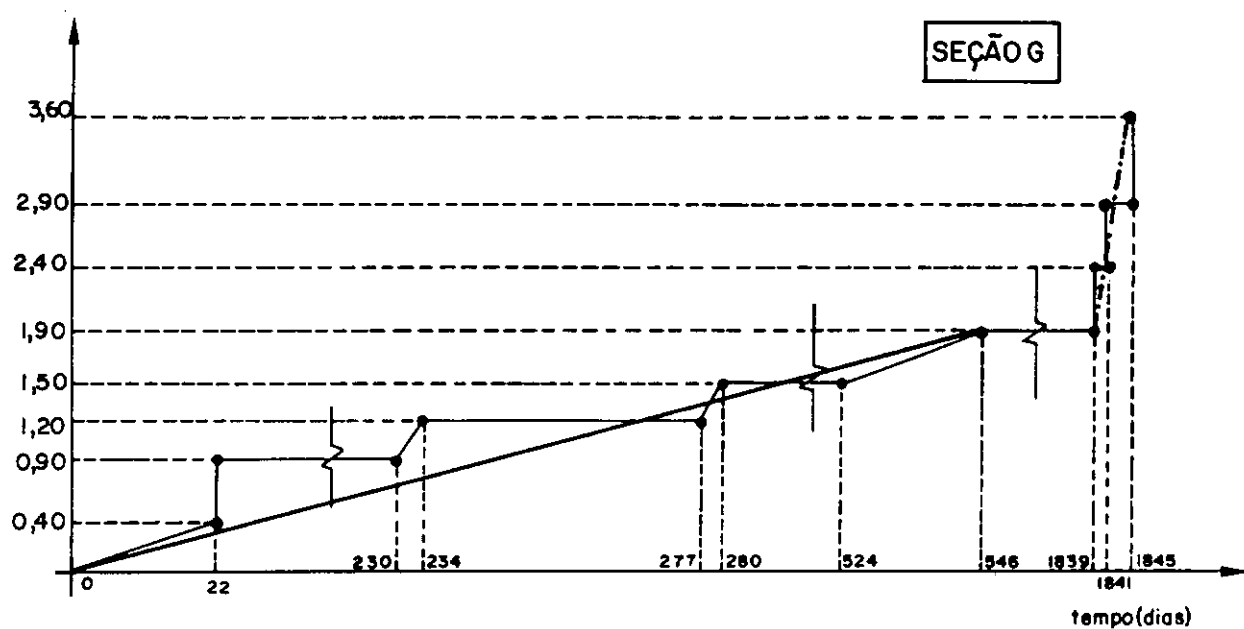
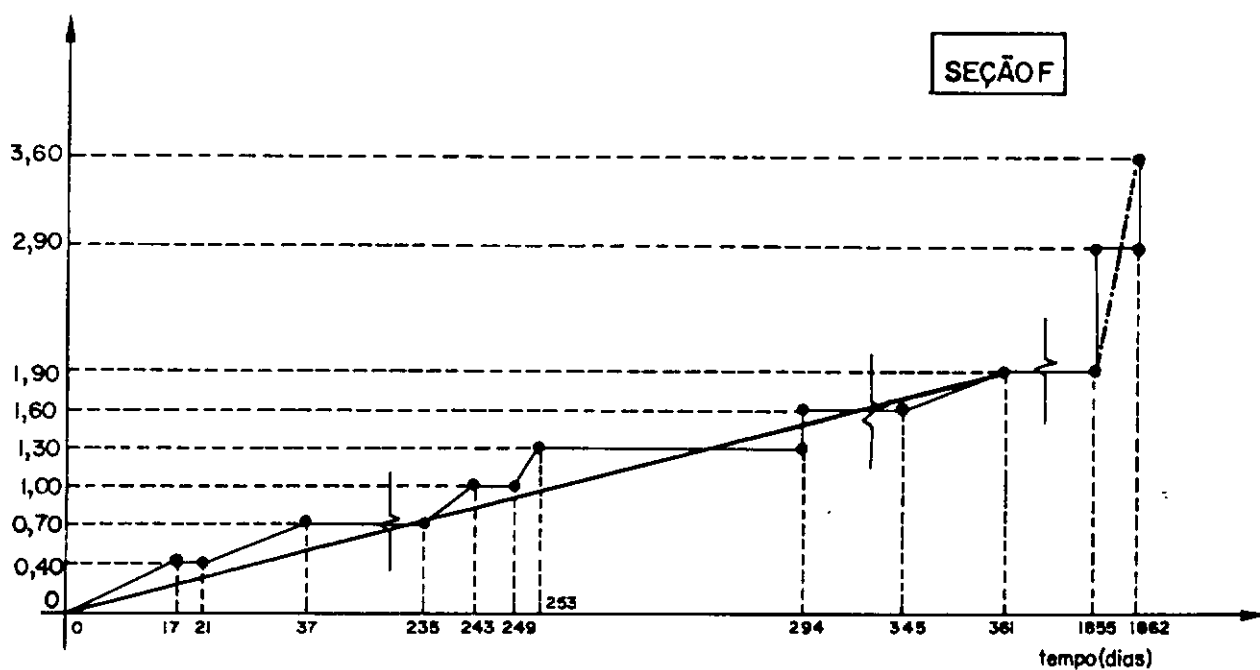


Figura II. 6 - Variação de altura do Aterro Experimental II em função do tempo



— 1ª FASE DE CARREGAMENTO
 - - - 2ª FASE DE CARREGAMENTO

Figura II. 7- Variação de altura do Aterro Experimental II em função do tempo

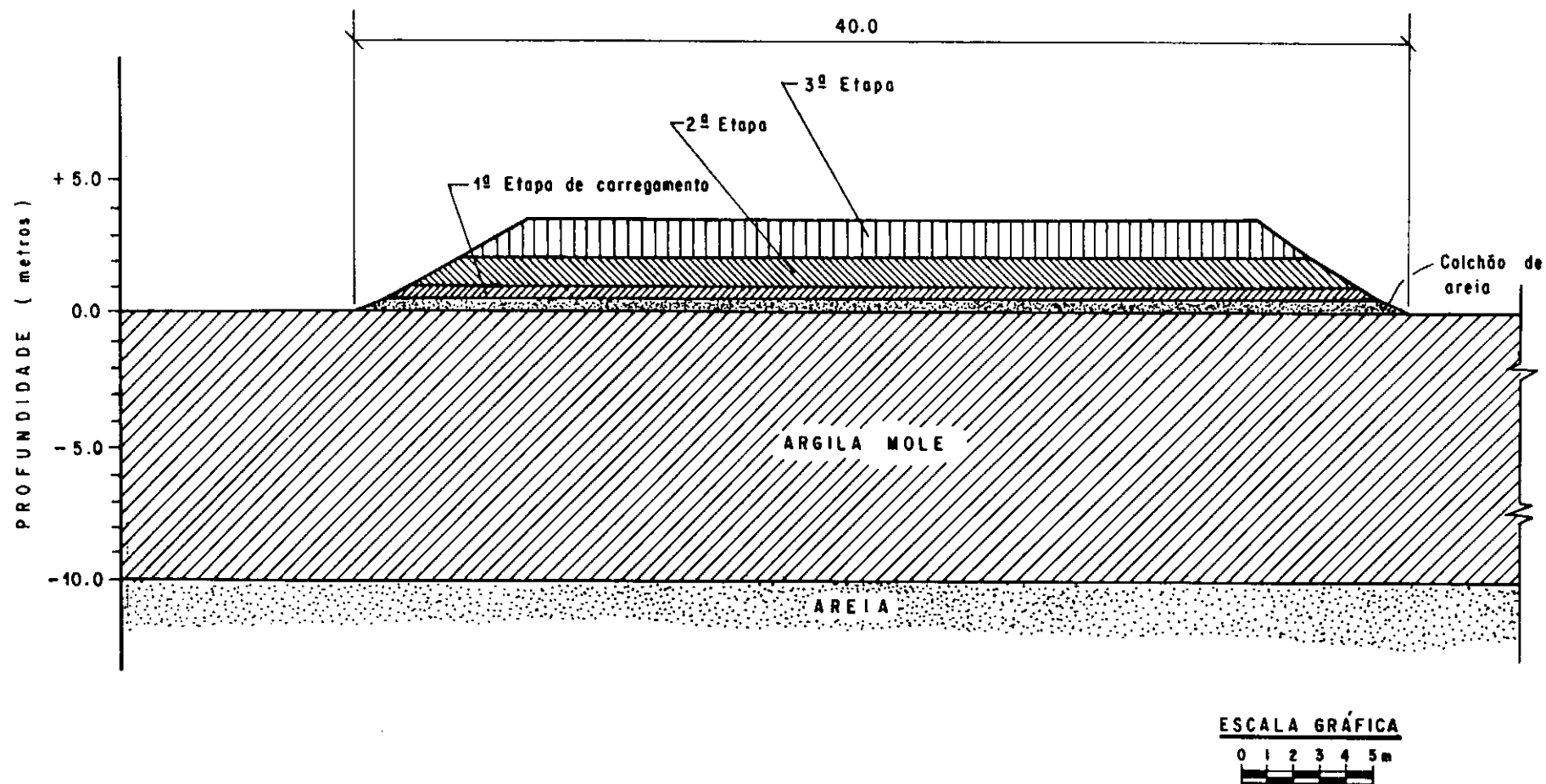


Figura II - 8 Seção Transversal Projetada do Aterro Experimental II

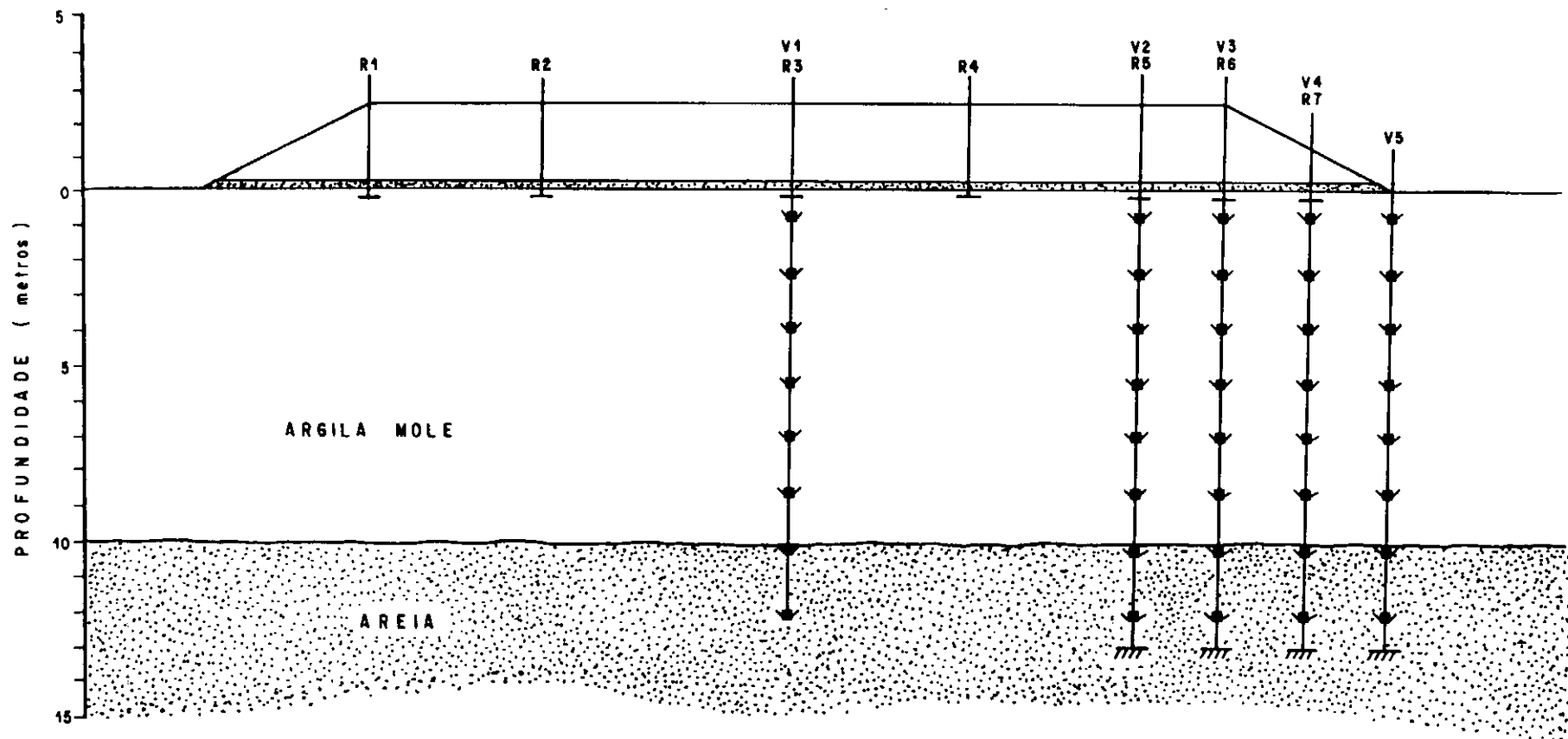
de início da construção foi determinado para cada fase distinta.

II.4. INSTRUMENTAÇÃO DO ATERRO EXPERIMENTAL II PARA MEDIÇÕES DE RECALQUE

As medições de recalque, nas diferentes seções do Aterro Experimental II, foram feitas através de placas de recalque e placas magnéticas acopladas à tubos de extensômetro magnético vertical. A seção transversal típica da instrumentação de campo, para medições de recalque, está apresentada na figura (II.9.)

Além da instrumentação relativa à recalques, foram também instalados inclinômetros para a medida de deslocamentos horizontais e piezômetros Casagrande e hidráulicos para a medida de poro-pressões (COLLET^[10]).

As curvas de recalque ao longo do tempo foram analisadas nas 1ª e 2ª fases de carregamento para as placas de recalque R_3 , instaladas no centro de cada uma das seções e representadas, esquematicamente na figura II.9. Na seção E, durante a construção da 2ª fase de carregamento, a placa de recalque R_3 foi danificada, desta forma, a análise da referida etapa foi realizada através das leituras da placa de recalque R_{12} , também localizada no eixo longitudinal do aterro, próxima ao centro da seção.



SÍMBOLO	DENOMINAÇÃO
(V) 	EXTENSÔMETRO MAGNÉTICO VERTICAL
(R) 	PLACA DE RECALQUE

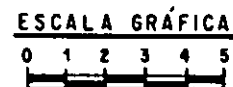


Figura II-9 - Seção Transversal Típica da Instrumentação de Campo para Medições de Recalque

O presente trabalho utilizou em todas as seções as medições das placas de recalques R_3 (e R_{12} na seção E, 2ª fase de carregamento) realizadas até 17/07/1987.

A escolha destas placas de recalque para a análise deveu-se ao fato das mesmas estarem situadas no centro e ao longo do eixo longitudinal das seções do aterro e por ter sido constatado, após a observação das curvas de recalque ao longo do tempo, obtidas pelo "Programa Sarapuí", apresentado no Apêndice B deste trabalho, que os dados destas placas são representativos dos recalques de cada uma das seções. As curvas recalque - tempo dessas placas são apresentadas no Apêndice A.

CAPÍTULO III

DESCRIÇÃO DAS TEORIAS APLICADAS À ANÁLISE DE
 RECALQUES E COEFICIENTES DE ADENSAMENTO

III.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão descritos os métodos teóricos de análise de recalques, desenvolvidos com o objetivo de prever recalques finais de uma obra e estimar valores de coeficiente de adensamento através das medidas de recalques com o tempo. Estes métodos são o método de ELLSTEIN^[16,17], o método de LONG e CAREY^[24], o método de TAN^[43], o método de ASAKA^[5] modificado por MAGNAN e DEROY^[29]. Descreve-se também o método utilizado para determinação de recalques imediatos, baseado na Teoria da Elasticidade e o método convencional para cálculo de $s(\infty)$.

As análises teóricas são, em geral, deduzidas da solução clássica de Terzaghi, no caso de adensamento unidimensional, e da solução de Barron para um dreno perfeito dentro de um maciço de solo homogêneo, no caso de adensamento horizontal.

III.2. NOMENCLATURA DE RECALQUES

Neste trabalho, os diferentes tipos de recalque são definidos por:

s_0 = recalque imediato, ocorre imediatamente após a aplicação do carregamento

. $s(\infty)$ = recalque final por adensamento, ocorre após a dissipação de todo excesso de poro-pressão gerado pela aplicação do carregamento

. $s(t)$ = recalque por adensamento em um tempo t ; logo:

$$s(t) = U_v \cdot s(\infty) \quad (\text{III.2.1})$$

onde U_v = grau de adensamento médio vertical

ou

$$s(t) = U_h \cdot s(\infty) \quad (\text{III.2.2})$$

onde U_h = grau de adensamento médio radial

. s_t = recalque total em um tempo t ; logo

$$s_t = s_o + s(t) \quad (\text{III.2.3})$$

ou

$$s_t = s_o + U_v \cdot s(\infty) \quad (\text{III.2.4})$$

no caso de adensamento horizontal utiliza-se U_h ao invés de U_v

. s_f = recalque final; logo

$$s_f = s_o + s(\infty) \quad (\text{III.2.5})$$

. s_{sec} = recalque secundário

. s_{fsec} = recalque final incluindo o recalque secundário,

logo;

$$s_{\text{fsec}} = s_f + s_{\text{sec}} \quad (\text{III.2.6})$$

III.2.1. Recalques iniciais

Os recalques iniciais, também chamados de recalques imediatos ou recalques não drenados são recalques que ocorrem imediatamente após a aplicação do carregamento e são associados às deformações cisalhantes elásticas não drenadas.

Para a determinação dos recalques iniciais utiliza-se a teoria da elasticidade. Uma das formas mais convenientes para o cálculo de recalques iniciais de aterros sobre solos moles é através do gráfico proposto por GIROUD^[21]. Neste procedimento, os recalques imediatos sob qualquer ponto de um aterro trapezoidal podem ser prontamente obtidos usando-se a figura (III.1), para o coeficiente de Poisson não drenado (ν_u) igual à 0,5, e calculados pela expressão:

$$s_o = \frac{\gamma h}{E_u} \frac{b_1^2}{b_1 - b_2} \left[r_1 - \left(\frac{b_2}{b_1} \right) r_2 \right] \quad (\text{III.2.7})$$

onde s_o = recalque inicial

γ = peso específico total do aterro

h = altura do aterro

r_1 = coeficiente das dimensões do aterro relativo à $2H/b_1$

r_2 = coeficiente das dimensões do aterro relativo à $2H/b_2$

b_1 e b_2 = definidos na figura (III.1)

E_u = módulo de Young ou módulo de elasticidade não drenado

III.3. SOLUÇÃO CLÁSSICA DE TERZAGHI

III.3.1. Introdução

A teoria de adensamento unidimensional de TERZAGHI^[45] é a base para os procedimentos convencionais de estimativa de velocidade de recalque de camadas de argila submetidas à carregamentos.

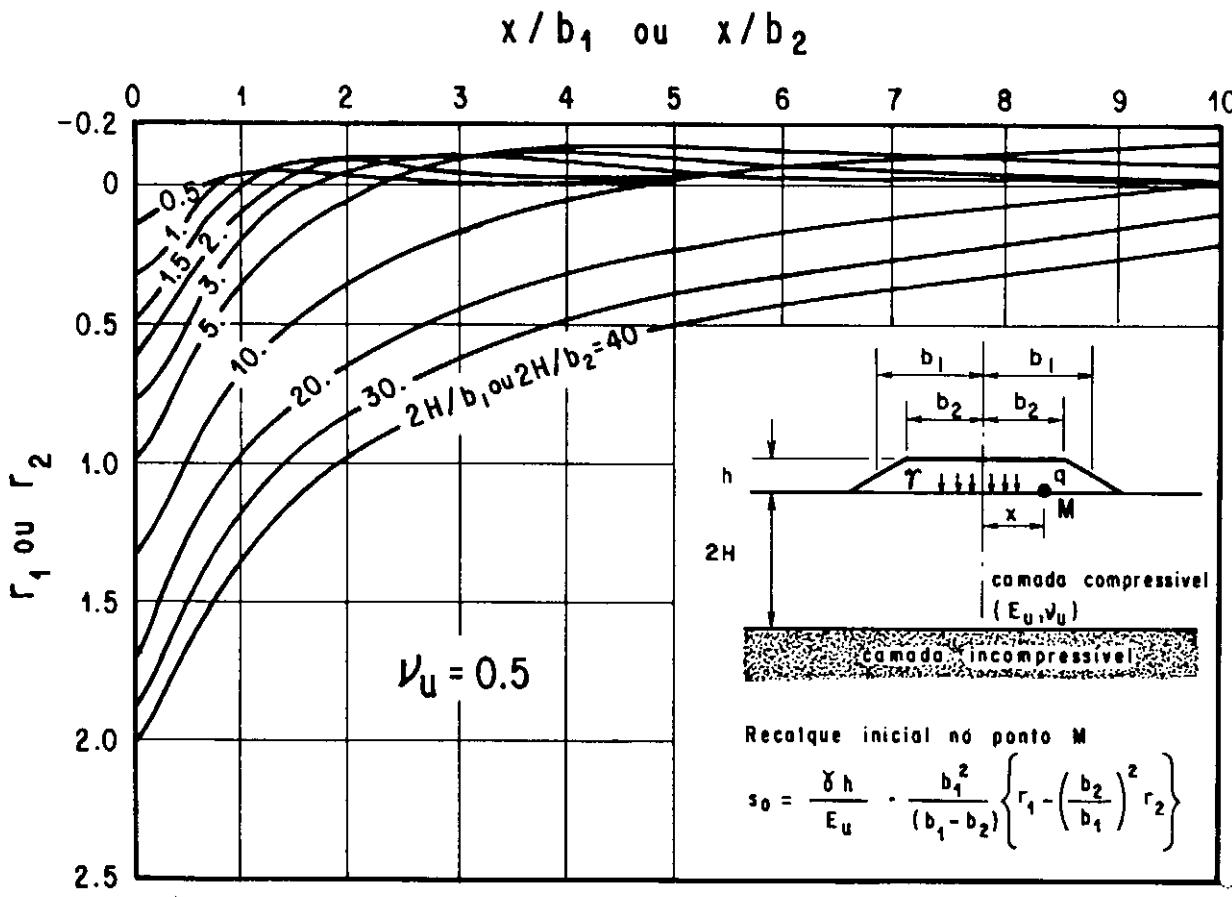


Figura III - 1 - Gráfico para determinação dos coeficientes r_1 e r_2 necessários ao cálculo do recalque inicial

III.3.2. Fundamentos Teóricos

As hipóteses consideradas na dedução da teoria, conforme descrito em TAYLOR^[44] são:

- (a) O solo é homogêneo,
- (b) Os vazios do solo estão completamente preenchidos com fluido incompressível (água),
- (c) Os componentes sólidos do maciço de solo e a água são incompressíveis,
- (d) A compressão é unidimensional,
- (e) É válida a lei de Darcy,
- (f) O fluxo é unidimensional,
- (g) Valores constantes para certas propriedades do solo as quais, na realidade, variam com a pressão aplicada,
- (h) Massas infinitesimais de solos são representativas da massa real de campo,
- (i) A relação entre o índice de vazios e as tensões efetivas verticais independem do tempo, ver figura (III.2).

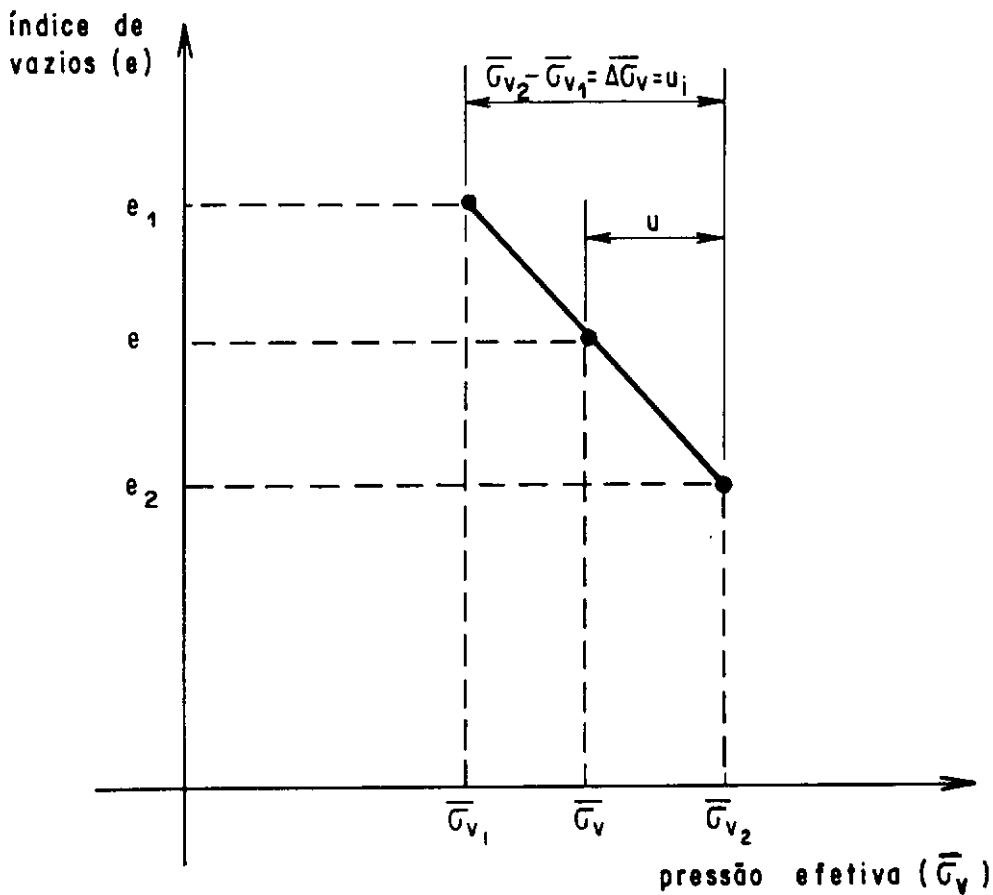
A solução da equação de adensamento unidimensional, conforme dedução de TAYLOR^[44] é expressa por

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (\text{III.3.1})$$

onde u = excesso de poro-pressão em um dado tempo t

t = tempo

z = distância medida da superfície da camada de argila até o ponto considerado



e_1 = índice de vazios inicial de uma amostra de solo

e_2 = índice de vazios final de uma amostra de solo

$\bar{\sigma}_{v1}$ = pressão efetiva inicial na amostra de solo

$\bar{\sigma}_{v2}$ = pressão efetiva final na amostra de solo

u_i = excesso de poro - pressão inicial gerada pelo incremento de pressão ($\Delta\bar{\sigma}_v$) aplicado a amostra de solo

u = excesso de poro - pressão correspondente a pressão efetiva ($\bar{\sigma}_v$) e ao índice de vazios (e)

Figura III-2 - Relação entre a pressão efetiva ($\bar{\sigma}_v$) e o índice de vazios (e) para um incremento típico de pressão ($\Delta\bar{\sigma}_v$) - Solução clássica de TERZAGHI para adensamento unidimensional

c_v = coeficiente de adensamento vertical dado pela expressão

$$c_v = \frac{k_v(1 + e)}{a_v \gamma_w} \quad (\text{III.3.2})$$

onde e = índice de vazios

k_v = coeficiente de permeabilidade vertical

γ_w = peso específico da água

a_v = coeficiente de compressibilidade dado pela expressão

$$a_v = - \frac{\Delta e}{\Delta \bar{\sigma}_v} \quad (\text{III.3.3})$$

onde $\Delta \bar{\sigma}_v$ = variação de pressão efetiva vertical

Δe = variação do índice de vazios

A solução da equação (III.3.1), apresentada em

TAYLOR^[44] é dada pela expressão

$$u = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2u_i}{M} \left(\text{sen} \frac{Mz}{H_d} \right) \exp(-M^2 T_v) \quad (\text{III.3.4})$$

onde \exp = base dos logarítmos naturais (igual a 2,732...)

u_i = excesso de poro-pressão inicial

$M = \frac{\pi}{2} (2m + 1)$, sendo m = inteiro

$H_d = \frac{\text{espessura da camada onde ocorre processo de adensamento}}{\text{número de superfícies drenantes}}$

T_v = fator tempo vertical dada por

$$T_v = \frac{c_v t}{H_d^2} \quad (\text{III.3.5})$$

O grau de adensamento para qualquer ponto da massa de solo é definido por

$$U_z = \frac{e_1 - e}{e_1 - e_2} \quad (\text{III.3.6})$$

onde e_1 = índice de vazios inicial

e_2 = índice de vazios final

e = índice de vazios correspondentes à uma pressão $\bar{\sigma}_v$ que ocorre em um tempo t

Admitindo-se a_v constante como na figura (III.2)

tem-se

$$U_z = \frac{\bar{\sigma}_v - \bar{\sigma}_{v_1}}{\sigma_{v_2} - \sigma_{v_1}} \quad (\text{III.3.7})$$

ou

$$U_z = 1 - \frac{u}{u_i} \quad (\text{III.3.8})$$

O grau de adensamento médio vertical U_v , ao longo de uma camada de solo de espessura $2H$, em qualquer tempo t , durante o processo de adensamento, pode ser definido como a razão entre o excesso de poro-pressão no tempo t , expressa por

$$\frac{1}{2H} \int_0^{2H} u dz \quad (\text{III.3.9})$$

e o excesso de poro-pressão inicial, expresso por

$$\frac{1}{2H} \int_0^{2H} u_i dz \quad (\text{III.3.10})$$

e como o grau de adensamento médio vertical é igual ao valor médio de U_z ao longo da camada de solo, pode-se escrever

$$U_z = 1 - \frac{\int_0^{2H} u dz}{\int_0^{2H} u_i dz} \quad (\text{III.3.11})$$

A solução da equação III.3.11 também apresentada em TAYLOR^[44], para o caso de u_i constante ao longo da camada de argila é

$$U_V = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M^2} \exp(-M^2 T_V) \quad (\text{III.3.12})$$

A equação (III.3.12) pode ser expressa, em função do coeficiente de adensamento vertical, tendo em vista a equação (III.3.5), pela expressão

$$U_V = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{8}{\pi^2 (2m+1)^2} \exp \left[- \frac{\pi^2}{4} \cdot \frac{c_v (2m+1)^2 t}{H_d^2} \right] \quad (\text{III.3.13})$$

e também com grande precisão, conforme descrição de TAYLOR^[44], pelas seguintes expressões empíricas

$$\cdot \text{ para } U_V < 60\% : T_V = \frac{\pi}{4} U_V^2 \quad (\text{III.3.14})$$

$$\cdot \text{ para } U_V > 60\% : T_V = -0,9332 \log(1-U_V) - 0,0851 \quad (\text{III.3.15})$$

III.4. SOLUÇÃO DE BARRON

III.4.1. Introdução

A teoria do adensamento devido ao fluxo horizontal é uma extensão da teoria de adensamento de TERZAGHI. A solução foi apresentada por L.RENDULIC em 1935 e um estudo mais completo da influência dos drenos verticais no adensamento foi apresentado por BARRON^[7].

Conforme mostrado em RICHART^[38], BARRON considerou que dois tipos de deformações verticais ocorrem na camada de argila. São elas:

- a) Deformações verticais livres: resultantes de distribuição uniforme de carga na superfície da camada, através de carregamento flexível.
- b) Deformações verticais iguais: resultantes da imposição da mesma deformação vertical em todos os pontos da superfície da camada, através de carregamento rígido.

Na condição de deformações verticais livres foi suposto que os recalques na superfície não alteram a distribuição de carga para o solo. Porém, na realidade, o adensamento ocorre mais rapidamente próximo ao dreno de areia, causando um maior recalque superficial nesta região, o que acarretará em uma redistribuição no carregamento superficial. Isto se torna mais evidente se o material usado na construção de um aterro, por exemplo, tiver uma tendência a arquear através de tais depressões. Em um caso extremo, o arqueamento pode redistribuir as cargas na superfície e então o recalque superficial será o mesmo para todos os pontos; esta é a condição de deformações verticais iguais.

Nas duas hipóteses acima, BARRON considerou tambem o efeito de "smear", no solo próximo ao limite do dreno e o efeito da resistência ao fluxo proporcionado pelo material do dreno. Define-se como "smear" o efeito causado no solo pelo equipamento de abertura do dreno e que tem como consequência, di

ficultar o fluxo horizontal da água. Define-se como resistên
cia do dreno a perda de carga que ocorre no fluido devido ao ma
terial do dreno.

III.4.2. Fundamentos Teóricos

III.4.2.1. Geometria de instalação de drenos de areia

CONforme descrito em RICHART^[38], a zona de influência
de cada dreno de areia de raio efetivo r_w executado segundo uma malha
triangular ou quadrangular é aproximadamente um círculo de raio
 r_e , como mostra a figura (III.3.(a)). Desta forma, considera-se
o fluxo horizontal e o adensamento num volume de solo de espes
sura unitária contida entre as distâncias r_e e r_w .

O cálculo do diâmetro de influência d_e de um dreno,
executado com base na figura (III.3(b)) é da seguinte forma:

a) Malha quadrangular

$$\cdot \text{ a área de influência é } \frac{\pi d_e^2}{4}$$

$$\cdot \text{ a área do quadrado de lado } s \text{ é } s^2$$

como

$$\frac{\pi d_e^2}{4} = s^2 \quad (\text{III.4.1})$$

tem-se

$$d_e = 1,13 s \quad (\text{III.4.2})$$

b) Malha triangular

$$\cdot \text{ a área de influência é } \frac{\pi d_e^2}{4}$$

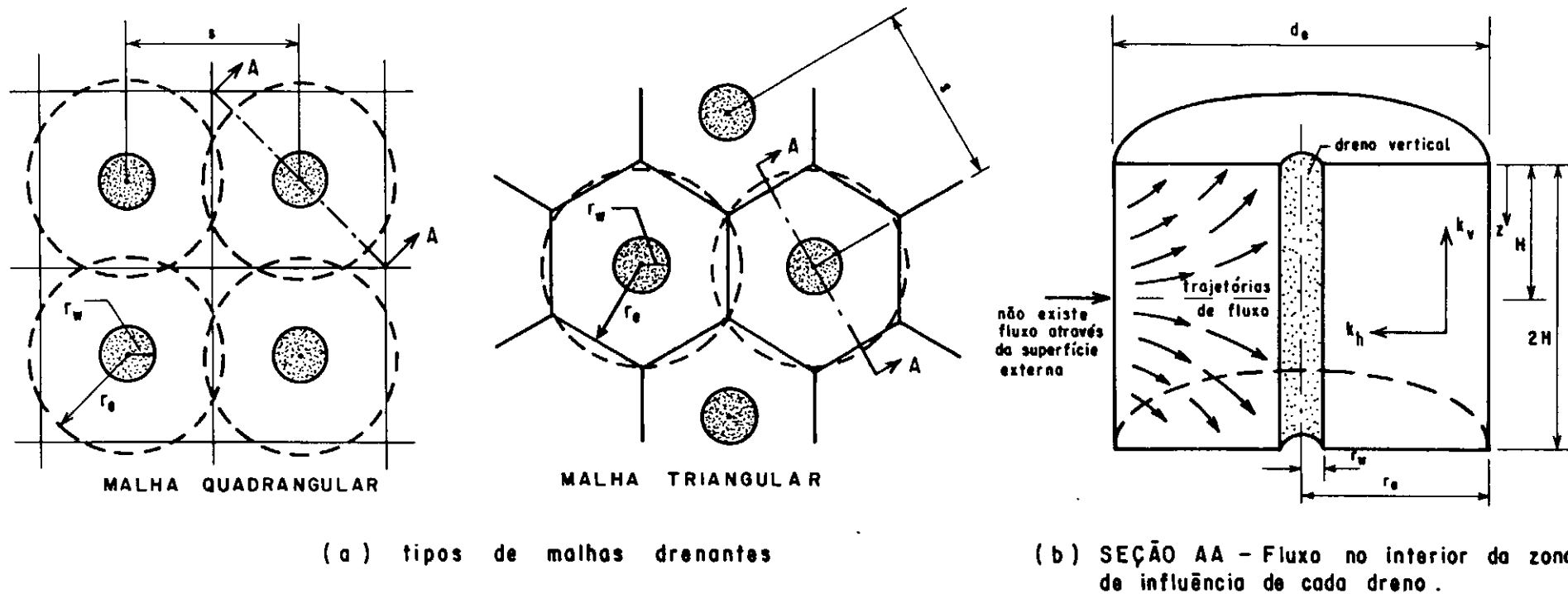


Figura III - 3 - Representação esquemática de drenos verticais

. a área do hexágono de lado $\frac{s}{2}$ é $\frac{s^2}{2} \sqrt{3}$

como

$$\frac{\pi d_e^2}{4} = \frac{s^2 \sqrt{3}}{2} \quad (\text{III.4.3})$$

tem-se

$$d_e = 1,05 s \quad (\text{III.4.4})$$

III.4.2.2. Adensamento radial e vertical

Para o caso da ocorrência simultânea de adensamentos horizontal e vertical, a equação (III.3.1) é escrita, em termos de coordenadas cilíndricas, segundo BARRON^[7], como

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_h \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial u}{\partial r} \right) + c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (\text{III.4.5})$$

onde r = abscissa do ponto ao longo de r_e

c_h = coeficiente de adensamento horizontal dado por

$$c_h = \frac{k_h (1 + e)}{a_v \gamma_w} \quad (\text{III.4.6})$$

onde k_h = coeficiente de permeabilidade horizontal

De acordo com TERZAGHI^[46], a relação matemática reduzida para o grau de adensamento vertical U_v , horizontal U_h e combinado $U_{v,h}$ foi desenvolvida por CARRILLO^[8] e é mostrada a seguir

$$(100\% - U_{v,h}) = \frac{1}{100} (100\% - U_v) (100\% - U_h) \quad (\text{III.4.7})$$

III.4.2.3. Deformações verticais livres sem efeito "smear" e sem influência da resistência do dreno

Considerando-se somente o fluxo horizontal, a equação (III.4.5) simplifica-se para:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_h \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial u}{\partial r} \right) \quad (\text{III.4.8})$$

e as condições de contorno que devem ser satisfeitas são:

- 1º O excesso de poro-pressão inicial u_i é uniforme ao longo da massa de solo, quanto $t = 0$.
- 2º O excesso de poro-pressão na superfície do dreno de areia r_w é zero quando $t > 0$.
- 3º A superfície definida pelo diâmetro d_e é considerada impermeável, então $\frac{\partial u}{\partial r} = 0$ quando $r = r_e$.

A solução da equação (III.4.8), conforme apresentado em RICHART^[38] para as equações de contorno acima descritas é dada pela expressão:

$$u_h = u_i \sum_{\alpha_1, \alpha_2, \dots}^{\alpha=\infty} \frac{-2 U_1(\alpha) \cdot U_0\left(\frac{\alpha h}{r_w}\right)}{\alpha [n^2 U_0^2(\alpha_n) - U_1^2(\alpha)]} \cdot \exp(-4 \alpha^2 n^2 T_h) \quad (\text{III.4.9})$$

e

$$\bar{u}_h = u_i \sum_{\alpha_1, \alpha_2, \dots}^{\alpha=\infty} \frac{4 U_1^2(\alpha)}{\alpha^2 (n^2 - 1) [n^2 U_0^2(\alpha_n) - U_1^2(\alpha)]} \cdot \exp(-4 \alpha^2 n^2 T_h) \quad (\text{III.4.10})$$

onde u_h = excesso de poro-pressão em qualquer ponto de abscissa r , no tempo t , devido somente ao fluxo horizontal.

\bar{u}_h = excesso de poro-pressão média ao longo da massa de solo para qualquer tempo t , devido somente ao fluxo horizontal.

$$U_1(\alpha) = J_1(\alpha) \cdot Y_0(\alpha) - Y_1(\alpha) \cdot J_0(\alpha)$$

$$U_0(\alpha_n) = J_0(\alpha_n) \cdot Y_0(\alpha) - Y_0(\alpha_n) \cdot J_0(\alpha)$$

$$U_0\left(\frac{\alpha_h}{r_w}\right) = J_0\left(\frac{\alpha_h}{r_w}\right) \cdot Y_0(\alpha) - Y_0\left(\frac{\alpha_h}{r_w}\right) \cdot J_0(\alpha)$$

J_0, J_1 = funções de Bessel de primeira classe, ordem zero e primeira ordem, respectivamente.

Y_0, Y_1 = funções de Bessel de segunda classe, ordem zero e primeira ordem, respectivamente

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots$ = raízes das funções de Bessel

$$n = \frac{r_e}{r_w} = \frac{d_e}{d_w} \quad (\text{III.4.11})$$

T_h = fator tempo horizontal dado pela expressão:

$$T_h = \frac{c_h t}{d_e^2} \quad (\text{III.4.12})$$

III.4.2.4. Deformações verticais iguais sem efeito "smear" e sem influência da resistência do dreno

A solução analítica, conforme mostrado em RICHART^[38] para

a condição anterior é dada por

$$u_h = \frac{4 \bar{u}}{d_e^2 f(n)} \left[r_e^2 \exp \frac{r}{r_w} - \frac{r^2 - r_w^2}{2} \right] \quad (\text{III.4.13})$$

$$\text{onde } \bar{u} = u_i \exp - \frac{8 T_h}{f(n)} \quad (\text{III.4.14})$$

$$f(n) = \frac{n^2}{n^2 - 1} \ln(n) - \frac{3n^2 - 1}{4n^2} \quad (\text{III.4.15})$$

Os métodos de análise de recalques descritos a seguir, utilizam a hipótese de deformações verticais iguais dada, em função do grau de adensamento horizontal, pela expressão:

$$U_h = \left[1 - \exp \left(\frac{-8 c_h}{d_e^2 f(n)} \cdot t \right) \right] \quad (\text{III.4.16})$$

Conforme citado em RICHART^[38], a diferença entre os resultados obtidos através das duas considerações ((deformações verticais livres e deformações verticais iguais) é muito pequena, principalmente para os valores de n maiores que 10 ou U_h de aproximadamente 50%. Como o tempo necessário para a elaboração dos cálculos pelo critério das deformações verticais livres é cerca de quinze vezes maior do que o tempo necessário ao cálculo pelo critério das deformações verticais iguais, a solução através de deformações verticais iguais é a preferida.

III.5. MÉTODO DE ELLSTEIN

III.5.1. Introdução

O método proposto por ELLSTEIN^[16,17], necessita como dado único o conhecimento de um trecho da curva de recalque ao longo do tempo observada no campo, em áreas sujeitas à adensamento com fluxo vertical, para determinação da velocidade de a densamento do coeficiente de adensamento vertical e do recalque final por adensamento.

Este método está baseado na equação (III.3.13) clássica da teoria de TERZAGHI, para adensamento unidimensional.

Segundo o autor, é necessário que já se tenha alcançado mais do que 20% do adensamento primário para a aplicação do método.

ELLSTEIN tomou por base CARRILLO^[9] que desenvolveu um método para a determinação do grau de adensamento primário ocorrido em uma obra a partir do conhecimento do tempo de carregamento (t_o), do valor dos recalques ocorridos e da velocidade de recalque.

Desta forma, o método de CARRILLO só é aconselhável para longos períodos de medição dos recalques no campo, onde a determinação do tempo de carregamento (t_o) é irrelevante no cálculo. ELLSTEIN^[16,17], desenvolveu um método incremental que não necessita do valor de t_o .

III.5.2. Fundamentos teóricos

O desenvolvimento inicial do método coincide exatamente com o método de CARRILLO, citado anteriormente. Assim, usando-se somente o primeiro termo da série da equação (III.3.13) pode-se expressar o grau de adensamento vertical U_V através de

$$U_V = 1 - \frac{8}{\pi^2} \exp \left(-\frac{\pi^2}{4} \frac{c_V t}{H_d^2} \right) \quad (\text{III.5.1})$$

Sabendo-se que U_V pode ser escrito de acordo com a equação (III.2.1) e combinando-se esta equação com a equação (III.5.1) tem-se

$$\frac{s(t)}{s(\infty)} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \exp(-ct) \quad (\text{III.5.2})$$

onde c = coeficiente de "Carrillo" definido por

$$c = \frac{\pi^2 c_V}{4H_d^2} \quad (\text{III.5.3})$$

ou

$$c = \frac{\pi^2 T_V}{4t} \quad (\text{III.5.4})$$

A velocidade de recalque, é obtida derivando-se a equação (III.5.2) em relação ao tempo, o que resulta em

$$\frac{ds(t)}{dt} = \frac{8}{\pi^2} c s(\infty) \exp(-ct) \quad (\text{III.5.5})$$

Considerando-se as variações do recalque e da velocidade de recalque entre dois instantes t_1 e t_2 , nas equações

(III.5.2.) e (III.5.5), tem-se, respectivamente:

$$s(t_2) - s(t_1) = \frac{8s(\infty)}{\pi^2} [\exp(-ct_2) - \exp(-ct_1)] \quad (\text{III.5.6})$$

e

$$\frac{ds(t_1)}{dt} - \frac{ds(t_2)}{dt} = \frac{8cs(\infty)}{\pi^2} [\exp(-ct_2) - \exp(-ct_1)] \quad (\text{III.5.7})$$

Dividindo-se a equação (III.5.7) pela equação (III.5.6), o valor de c fica

$$c = \frac{\frac{ds(t_1)}{dt} - \frac{ds(t_2)}{dt}}{[s(t_2) - s(t_1)]} \quad (\text{III.5.8})$$

Para o cálculo do recalque final por adensamento, levando-se (III.5.8) em (III.5.7) tem-se:

$$s(\infty) = \frac{[s(t_1) - s(t_2)]}{[\exp(-ct_2) - \exp(-ct_1)]} \cdot \frac{\pi^2}{8} \quad (\text{III.5.9})$$

Da equação (III.5.2) que dá o valor do recalque por adensamento em um dado tempo t , vem

$$\frac{s(t_1)}{s(\infty)} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \exp(-ct_1) \quad (\text{III.5.10})$$

e

$$- \left[\frac{s(t_1)}{s(\infty)} - 1 \right] = - \left[\frac{-8}{\pi^2} \exp(-ct_1) \right] \quad (\text{III.5.11})$$

logo

$$\frac{s(\infty) - s(t_1)}{s(\infty)} = \frac{8}{\pi^2} \exp(-ct_1) \quad (\text{III.5.12})$$

e

$$\frac{s(\infty) \exp(-ct_1)}{s(\infty) - s(t_1)} = \frac{\pi^2}{8} \quad (\text{III.5.13})$$

Substituindo-se (III.5.13) em (III.5.9) tem-se:

$$s(\infty) = \frac{[s(t_1) - s(t_2)]}{[\exp(-ct_2) - \exp(-ct_1)]} \cdot \frac{s(\infty) \exp(-ct_1)}{s(\infty) - s(t_1)} \quad (\text{III.5.14})$$

Rearranjando fica:

$$s(\infty) = \frac{[s(t_1) - s(t_2)] \exp(-ct_1)}{[\exp(-ct_2) - \exp(-ct_1)]} + s(t_1) \quad (\text{III.5.15})$$

e

$$s(\infty) = \frac{[s(t_1) - s(t_2)] \exp[c(t_2 - t_1)]}{1 - \exp[c(t_2 - t_1)]} + s(t_1) \quad (\text{III.5.16})$$

III.5.3. Procedimento utilizado para os cálculos

O método de ELLSTEIN^[16,17] comporta as seguintes etapas:

- (a) Traçado da curva de recalque ao longo do tempo.
- (b) Escolha de um trecho da curva de recalque ao longo do tempo observada no campo, que mostre uma concavidade para cima, típica, conforme o trecho que contém os pontos 1 e 2 da figura (III.4.(a)).
- (c) Cálculo do coeficiente de "Carrillo", traçando a tangente à curva nos pontos 1 e 2 escolhidos no item b), de acordo com a equação (III.5.8).
- (d) Cálculo do coeficiente de adensamento vertical pela equação (III.5.3).
- (e) Aplicação da equação (III.5.16) para determinação do recalque final por adensamento.

III.5.4. Considerações sobre o Método

ELLSTEIN^[17] sugeriu considerar apenas valores de U_v superiores à 20% pois o método utiliza a equação (III.5.1) simplificada que é apenas o primeiro termo da série da equação completa (III.3.13). Para $U_v > 20\%$ o erro correspondente é inferior à 5%, sendo que, para valores de $U_v > 40\%$ o erro é inferior a 1%.

III.6. MÉTODO DE LONG e CAREY

III.6.1. Introdução

O método de LONG e CAREY^[28] baseia-se na análise das observações de recalque de campo para a determinação da velocidade de adensamento, do recalque final e do coeficiente de adensamento em áreas sujeitas à adensamento radial.

Este método foi desenvolvido a partir da teoria de adensamento com deformações verticais iguais onde para o caso de drenagem vertical e radial, o grau de adensamento combinado é fornecido pela equação (III.4.7) proposta por CARRILLO^[9].

LONG e CAREY^[28] consideram nesta equação, o grau de adensamento vertical $U_v = 0$, definindo, então o grau de adensamento "combinado" ($U_{v,h}$), a partir da equação (III.4.16), como

$$(1 - U_{v,h}) = \exp \left[-\frac{2T_{v,h}}{f(n)} \right] \quad (\text{III.6.1})$$

onde $T_{v,r}$ = fator tempo combinado, conforme denominação do autor, e definido por

$$T_{v,h} = \frac{c_{v,h} t}{r_e^2} \quad (\text{III.6.2})$$

onde $c_{v,h}$ = coeficiente de adensamento combinado, conforme denominação do autor, porém, na realidade, trata-se apenas do coeficiente de adensamento horizontal como visto acima.

III.6.2. Fundamentos teóricos

Após a construção do aterro, quando o mesmo está em processo de adensamento, os recalques observados podem ser escritos segundo a equação (III.2.4).

Desta forma, substituindo-se (III.6.1) em (III.2.4) tem-se

$$s_t = s_o + [1 - \exp(-\frac{2T_{v,h}}{f(n)})] s(\infty) \quad (\text{III.6.3})$$

ou

$$s_t = s_f - s(\infty) \exp(-\frac{2c_{v,h} t}{f(n) r_e^2}) \quad (\text{III.6.4})$$

Diferenciando-se a equação (III.6.4) com relação ao tempo, tem-se a velocidade de recalque, para um tempo qualquer, dada por

$$\frac{ds_t}{dt} = (\frac{2c_{v,h} s(\infty)}{f(n) r_e^2}) \exp(-\frac{2c_{v,h} t}{f(n) r_e^2}) \quad (\text{III.6.5})$$

O cálculo de $c_{v,h}$ é facilmente obtido aplicando-se logaritmo a equação (III.6.5), o que resulta em:

$$\log \frac{ds_t}{dt} = \log \frac{2 c_{v,h} s(\infty)}{f(n) r_e^2} + (\frac{0,868 c_{v,h}}{f(n) r_e^2}) t \quad (\text{III.6.6})$$

A equação (III.6.6) é uma reta que pode ser escrita na forma

$$y(t) = a + bt$$

e o coeficiente angular b é igual a

$$b = \frac{0,868 \, c_{v,h}}{f(n) \, r_e^2} \quad (\text{III.6.7})$$

Logo, ao se calcular a inclinação da reta $\log \frac{d_t}{dt} \times t$, isto é, a tangente do ângulo α , tem-se

$$b = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\log \left(\frac{ds_t}{dt} \right)_1 / \log \left(\frac{ds_t}{dt} \right)_2}{t_1 - t_2} \quad (\text{III.6.8})$$

comparando-se (III.6.7) e (III.6.8) pode-se escrever

$$c_{v,h} = \frac{\operatorname{tg} \alpha \, r_e^2 \, f(n)}{0,868} \quad (\text{III.6.9})$$

Para o cálculo do recalque final s_f , aplica-se o logarítimo natural à equação (III.6.4) e tem-se

$$\ln \left(\frac{s_f - s_t}{s(\infty)} \right) = \left(\frac{-2c_{v,h} t}{f(n) r_e^2} \right) \quad (\text{III.6.10})$$

Calculando-se (III.6.10) para dois tempos t_1 e t_2 e rearranjando-se tem-se

$$\ln\left(\frac{s_f - s_{t_2}}{s_f - s_{t_1}}\right) = \frac{-2c_{v,h}}{f(n)r_e^2} (t_2 - t_1) \quad (\text{III.6.11})$$

No caso do adensamento ser muito influenciado pela drenagem vertical, a separação de c_h e $c_{v,h}$ exige que o valor de c_v ou a razão $\frac{c_h}{c_v}$ seja conhecida.

III.6.3. Procedimento utilizado para os cálculos

O método de LONG e CAREY^[28] comporta as seguintes etapas, segundo MAGNAN^[30].

- a) Traçado da curva de recalque ao longo do tempo..
- b) Traçado da tangente em pontos arbitrários da curva de recalques ao longo do tempo e determinação da velocidade de recalque $\frac{ds_t}{dt}$, nestes pontos.
- c) Construção do gráfico $\log \frac{ds_t}{dt} \times t$.
- d) Traçado de uma reta passando pelos pontos do gráfico do item c), como mostra a figura (III.4.(b)).
- e) Cálculo de $c_{v,h}$ a partir da inclinação desta reta, definida pela $\tan \alpha$, usando a equação (III.6.9).
- f) Com o valor de $c_{v,h}$ e com os valores dos recalques s_{t_1} e s_{t_2} e respectivos tempos t_1 e t_2 , calcula-se o recalque final s_f pela equação (III.6.11).

III.6.4. Considerações sobre o método

LONG e CAREY^[28] observam que:

- a) O cálculo das tangentes à curva de recalques ao longo do tempo (velocidade de recalque) deve ser realizado para tempos posteriores ao final do carregamento.
- b) Ainda que faça a escolha dos tempos como citado acima, alguns pontos do início da curva $\frac{ds_t}{dt} \times t$ podem cair fora da linha reta formada pelos demais pontos. Isto deve-se à influência da drenagem vertical a qual é maior para $T_h < 0,1$ e pela mesma não ser considerada na formulação acima.
- c) O coeficiente de adensamento horizontal calculado e chamado pelo autor de coeficiente de adensamento acumulado $c_{v,h}$ é maior do que o coeficiente real de adensamento na direção horizontal c_h por causa da influência da drenagem vertical. Quando a influência da drenagem vertical é pequena e isto ocorre quando a distância entre drenos é pequena comparada à espessura da camada de argila, os valores de $c_{v,h}$ e c_h são próximos.

III.7. MÉTODO DE TAN

III.7.1. Introdução

O método proposto por TAN^[43], para determinação do recalque final em solos sujeitos à adensamento vertical ou horizontal, sugere a seguinte relação empírica para o processo de adensamento primário e secundário ocorrendo simultaneamente:

$$\frac{t}{s_t} = \alpha + \beta t \quad (\text{III.7.1})$$

onde α e β são constantes.

III.7.2. Fundamentos teóricos

Plotando-se a razão $\frac{t}{s_t}$ na ordenada e o tempo t na abcissa, a partir da equação (III.7.1) tem-se uma linha reta cujo coeficiente angular é β e o coeficiente linear é α .

A equação (III.7.1) pode também ser escrita como

$$\frac{1}{s_o + s(t)} = \beta + \frac{\alpha}{t} \quad (\text{III.7.2})$$

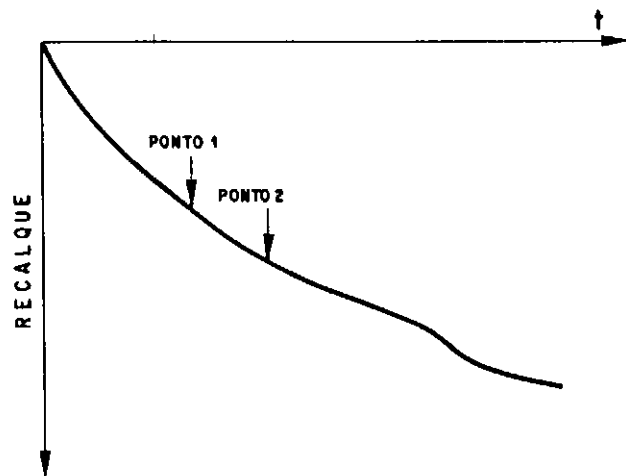
Quando $t \rightarrow \infty$ obtem-se o recalque final $s_f = s_o + s(\infty)$, através de

$$s_f = \frac{1}{\beta} \quad (\text{III.7.3})$$

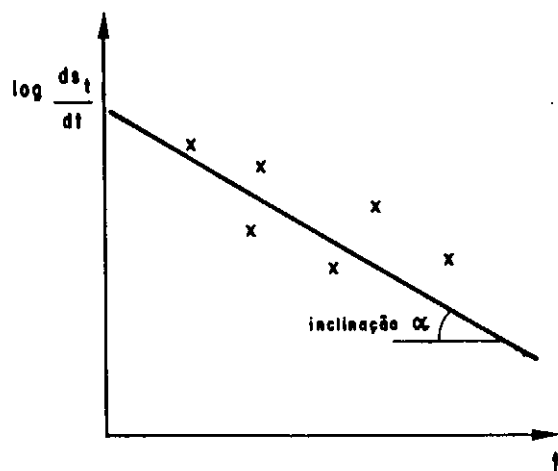
III.7.3. Procedimento utilizado para os cálculos

O método de TAN^[43] comporta as seguinte etapas, conforme citado por MAGNAN^[30]:

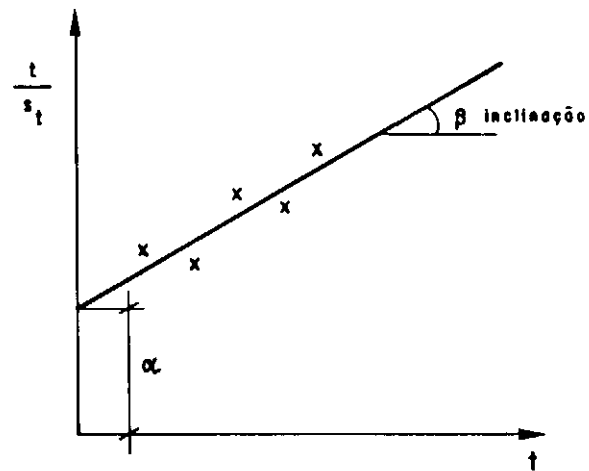
- a) Traçado da curva de recalque ao longo do tempo.
- b) Traçado do gráfico $\frac{t}{s_t}$ na ordenada e t na abcissa escolhem-se do vários pontos da curva observada de recalque ao longo do tempo, como mostra a figura (III.4.(c)).
- c) Cálculo do ângulo θ de inclinação traçada, já que $\beta = \text{tg } \theta$.



a) Método de ELLSTEIN



b) Método de LONG e CAREY



c) Método de TAN

Figura III - 4 - Construções Gráficas necessárias aos Métodos de ELLSTEIN, LONG E CAREY e TAN.

d) Cálculo do recalque final pela equação (III.7.3).

III.7.4. Considerações sobre o método

TAN^[43] observou que:

- a) A plotagem do gráfico $\frac{t}{s_t} = \alpha + \beta t$ não define uma linha reta para alguns pontos próximos à origem, isto é, para tempos pequenos, devido à influência do tempo necessário ao início da dissipação do excesso de poro-pressão.
- b) A equação (III.7.1), como está expressa, implica que os adensamentos primário e secundário ocorram simultaneamente.

III.8. MÉTODO DE ASAOKA

III.8.1. Introdução

O método de ASAOKA^[5] baseia-se na análise das observações de recalque de campo para a determinação do recalque final e dos coeficientes de adensamento vertical e horizontal em áreas sujeitas à drenagem vertical e horizontal, respectivamente. Este método utiliza a equação fundamental de MIKASA^[33].

$$c_v \frac{\partial^2 \epsilon_v}{\partial z^2} = \frac{\partial \epsilon_v}{\partial t} \quad (\text{III.8.1})$$

onde ε_v = deformação volumétrica vertical e as demais variáveis já foram definidas anteriormente.

Conforme citado por LAMBE^[27], MIKASA estudou o caso onde a razão k_v/m_v permanece constante mas os dois parâmetros variam. Então, a variação da deformação e conseqüentemente a do recalque com a profundidade e o tempo permanecem como mostra a teoria da adensamento usual mas o excesso de poro pressão segue uma lei diferente.

MAGNAN e DEROY^[24] modificaram o método de ASAOKA baseando-se nas equações de TERZAGHI (III.3.1) e de BARRON (III.4.5).

III.8.2. Fundamentos teóricos

A equação diferencial parcial de adensamento expressa em termos de deformação volumétrica vertical, utilizada por ASAOKA^[5], equação (III.8.1) e as equações expressas em termos de poro-pressão, utilizadas por MAGNAN e DEROY^[29], equações (III.3.1) e (III.4.5), podem ser expressas, segundo BALASUBRAMANIAN e BRENNER^[6], por uma equação diferencial ordinária em série da forma

$$s(t) + a_1 \frac{ds(t)}{dt} + \dots + a_n \frac{d^n s(t)}{dt^n} + \dots = b \quad (\text{III.8.4})$$

onde a_1, a_2, \dots, a_n, b = variáveis que dependem do coeficiente de adensamento e das condições de contorno da camada de argila.

Como, na maioria dos casos práticos, segundo BALASUBRAMANIAN e BRENNER^[6], é suficiente uma aproximação de primeira ordem ($n = 1$), a equação (III.8.4) pode ser reduzida a uma equação diferencial de primeira ordem.

$$s(t) + a_1 \frac{ds(t)}{dt} = b \quad (\text{III.8.5})$$

onde o valor de a_1 deduzido por ASAOKA^[5] para drenagem vertical é

$$a_1 = \frac{5}{12} \frac{H_d^2}{c_v} \quad (\text{III.8.6})$$

e de acordo com MAGNAN e DEROY^[29], é

$$a_1 = \frac{4}{\pi^2} \frac{H_d^2}{c_v}, \quad \text{para drenagem vertical} \quad (\text{III.8.7})$$

e

$$a_1 = \frac{f(n) d_e^2}{8c_h}, \quad \text{para drenagem horizontal} \quad (\text{III.8.8})$$

A solução da equação (III.8.5) é do tipo

$$s(t) = b + c e^{-\frac{t}{a_1}} \quad (\text{III.8.9})$$

onde c = variável

exp=e= base natural dos logarítmos neperianos

Conforme mostrado em MASSAD^[32], quando se trabalha na escala de t com valores discretos equi-espaçados de Δt , pode-se escrever, a equação (III.8.4) para o n -ésimo valor de $s(t)$

$$s(t)_n = b + c \exp \left(-\frac{\Delta t n}{a_1} \right) \quad (\text{III.8.10})$$

Em um gráfico $s(t)_{n+1}$ em função de $s(t)_n$ como mostra a figura (III.5.a), a equação (III.8.9) é uma reta de coeficiente angular β_1

$$\beta_1 = \frac{s(t)_{n+1} - s(t)_n}{s(t)_n - s(t)_{n-1}} = \frac{[b + c e^{\frac{\Delta t_{n+1}}{a_1}}] - [b + c e^{\frac{-\Delta t_n}{a_1}}]}{[b + c e^{\frac{-\Delta t_n}{a_1}}] - [b + c e^{\frac{-\Delta t_{(n-1)}}{a_1}}]} =$$

$$= \exp \left(\frac{-\Delta t}{a_1} \right) \quad (\text{III.8.11})$$

$$\text{então } \ln \beta_1 = \frac{-\Delta t}{a_1} \quad (\text{III.8.12})$$

e quando $s(t)_n = s(t)_{n+1}$, isto é, logo que a reta acima citada interceptar a bissetriz dos eixos cartesianos, o valor de $s(t)$ es tá estabilizado e pode-se então medir o recalque final nesta in terseção.

O valor do coeficiente de adensamento, proposto por ASAOKA^[5] para fluxo vertical é obtido da substituição do valor de a_1 de (III.8.6) em (III.8.12) e dado por

$$c_v = - \frac{5}{12} H_d^2 \frac{\ln \beta_1}{\Delta t} \quad (\text{III.8.13})$$

da mesma forma MAGNAN e DEROY^[29], substituindo o valor de a_1 de (III.8.7) em (III.8.12), propõe, para o coeficiente de adensamento vertical

$$c_v = - \frac{4}{\pi^2} H_d^2 \frac{\ln \beta_1}{\Delta t} \quad (\text{III.8.14})$$

e para o coeficiente de adensamento radial, a partir do valor de a_1 de (III.8.8) e (III.8.12)

$$c_h = - \frac{f(n)}{8} \cdot d_e^2 \cdot \frac{\ln \beta_1}{\Delta t} \quad (\text{III.8.15})$$

Os valores de c_v calculados através das equações (III.8.13) e (III.8.14) são muito próximos visto que as constantes $5/12$ e $4/\pi^2$ das equações (III.8.13) e (III.8.14) diferem apenas na segunda casa decimal. Optou-se nesse trabalho pela utilização da equação (III.8.14) de MAGNAN e DEROT:

III.8.3. Procedimentos utilizados para os cálculos

O método de ASAKA modificado por MAGNAN e DEROT^[29] comporta as seguintes etapas:

- a) Traçado da curva de recalque ao longo do tempo.
- b) Determinação dos recalques $s(t)_n$ e $s(t)_{n+1}$ na curva traçada no item a) para valor de Δt arbitrário.
- c) Plotagem dos pontos do gráfico cuja abscissa é dada por $s(t)_n$ e a ordenada $s(t)_n$.
- d) Traçado de uma reta passando pelos pontos citados no item c).
- e) Determinação da inclinação β_1 desta reta.
- f) Determinação do recalque final através da leitura das coordenadas do ponto de interseção da reta traçada no item d) e a bissetriz dos eixos cartesianos, ver figura (III.5.a).
- g) Cálculo de c_v e c_h pelas equações (III.8.14) e (III.8.15), respectivamente.

III.8.4. Considerações sobre o método

- a) No caso de carregamento por etapas pode-se construir diversas etapas sobre o gráfico $(s(t)_n, s(t)_{n+1})$ e cada reta corresponde a uma etapa do carregamento, ver figura (III.5.b).
- b) Em alguns casos práticos os pontos do gráfico $(s(t)_n, s(t)_{n+1})$ podem ser ajustados por duas retas (I) e (II) como mostra a figura (III.5.c), situação em que a segunda linha reta (II) representa a compressão secundária.

III.9. TEORIA CONVENCIONAL PARA O CÁLCULO DE RECALQUES FINAIS POR ADENSAMENTO

III.9.1. Introdução

Tendo em vista que foi dado prosseguimento aos cálculos de recalques de COLLET^[11] realizados para a 1ª fase de carregamento, a metodologia de COLLET foi adotada para a determinação dos recalques finais por adensamento da 2ª fase de carregamento, o qual foi realizado através da equação (WINTERKORN E FANG^[49])

$$s(\infty) = \sum_{i=1}^n \frac{h_a}{1 + e_1} \left[C_r \log \frac{\bar{\sigma}_{vm}}{\bar{\sigma}_{vo}} + C_c \log \frac{\bar{\sigma}_{vo} + \bar{\Delta\sigma}_v}{\bar{\sigma}_{vm}} \right]$$

(III.9.1)

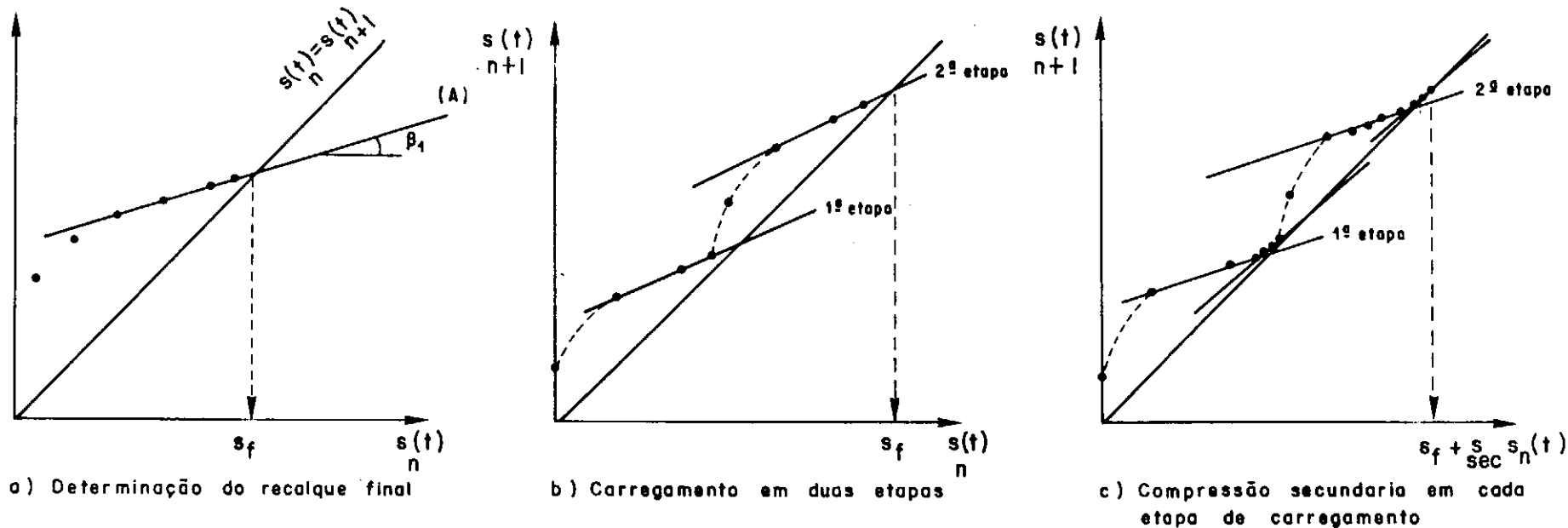


Figura III - 5 - Construções Gráficas do Método de Asoka modificado por MAGNAN e DEROUY.

onde

- n = subcamadas provenientes da divisão da camada da argila
- i = subcamada genérica
- h_a = espessura da subcamada

e demais parâmetros já definidos anteriormente.

III.9.2. Procedimento utilizado para os cálculos

Foi utilizado o procedimento adotado por COLLET [11] que consiste essencialmente em:

- (a) Divisão da camada de argila em subcamadas de espessura h_a .
- (b) Utilização de valores de coeficiente de compressibilidade C_c e de recompressão C_r corrigidos conforme proposição de SCHMERTMANN [40]
- (c) Cálculo da distribuição de pressões do aterro na camada de argila efetuado de acordo com o método indicado por NAVFAC-DM7 [35], conforme a figura III.6. e a equação

$$\sigma_z = \frac{p}{\pi} (\bar{\alpha} + \sin \bar{\alpha} \cdot \cos 2\bar{\beta}) \quad (\text{III.9.2})$$

de σ_z = pressão devido ao carregamento na profundidade z da camada de argila

p = sobrecarga devido ao peso próprio do aterro

$\bar{\alpha}$ e $\bar{\beta}$ = definidos na figura III.6.

Como o cálculo da distribuição de pressões será feito sob o cen

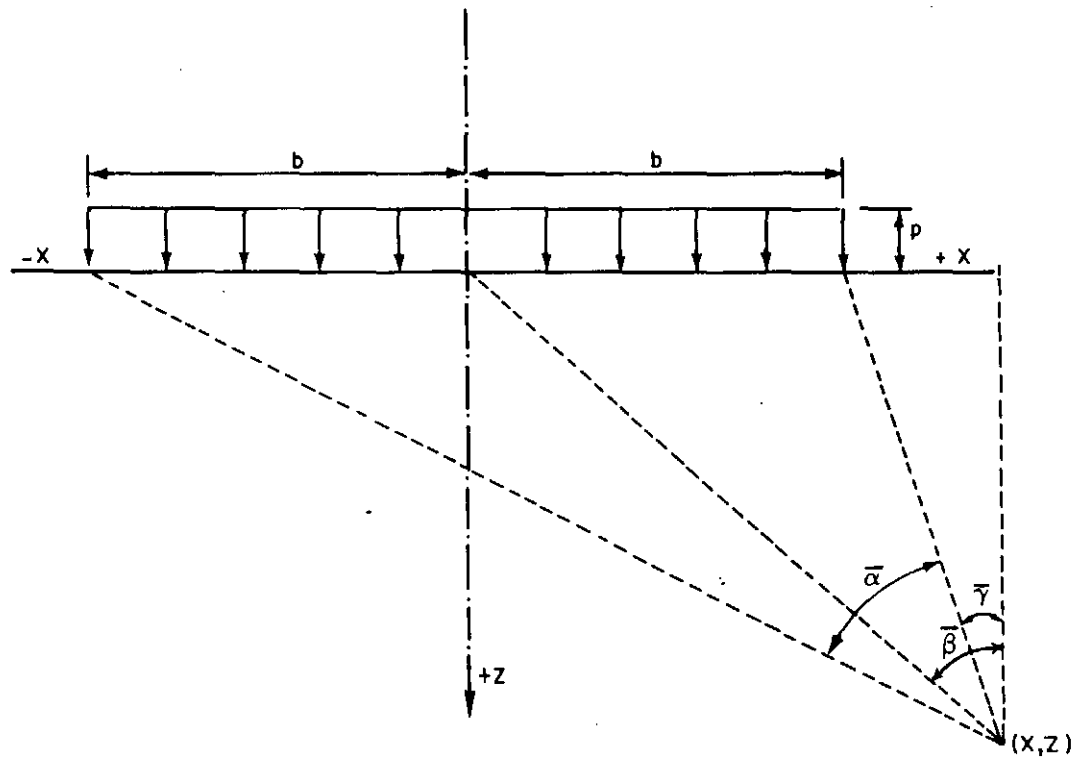


Figura III.6 - Gráfico necessário ao cálculo da distribuição de pressões do aterro na argila mole
(APUD NAV-FAC - I [34])

tro de cada seção do aterro tem-se $\bar{\beta} = 0$, então a equação (III.9.2) será

$$\sigma_z = \frac{p}{\pi} (\bar{\alpha} + \text{sen } \bar{\alpha}) \quad (\text{III.9.3})$$

Optou-se pela utilização da equação III.9.2 ao invés de cálculo por carregamento trapezoidal, que se aproxima mais do caso de aterros, visto ser a diferença entre os dois valores desprezível para o presente caso de cálculo, isto é, no eixo do Aterro.

III.9.3. Considerações do efeito da submersão do aterro no cálculo dos recalques finais

Em concordância com o trabalho de COLLET^[11] foi também adotado aqui o método proposto por CRUZ^[15] para a consideração do efeito da submersão do aterro no cálculo de recalques.

Este método consiste de se descontar da carga total $\Delta\sigma_v$ uma parcela, devida a submersão, variável de zero até o valor do recalque total sendo que, na prática, segundo CRUZ, pode-se descontar um valor igual à metade do recalque total $s(\infty)$, conforme a expressão

$$\Delta\bar{\sigma}_v = \Delta\sigma_v - \frac{s'(\infty)}{2} \cdot \gamma_w \quad (\text{III.9.4})$$

onde $s'(\infty) = m_v \Delta\sigma_v h'$ (recalque final por adensamento sem a consideração do efeito da submersão)

h' = espessura da camada de argila descontado o recalque final por adensamento da fase anterior ao carregamento considerado

$\Delta\sigma_v$ = variação da tensão vertical total

III.10. COMENTÁRIOS FINAIS

III.10.1. Métodos apresentados

Além dos métodos tradicionais de TERZAGHI e BARRON foram descritos neste capítulo os métodos de ELLSTEIN, LONG e CAREY, TAN e ASAOKA. Os dois primeiros métodos utilizam a velocidade de recalques para o cálculo de recalque infinito e coeficiente de adensamento. Entretanto o método de ELLSTEIN é válido apenas para drenagem unidimensional enquanto que o de LONG e CAREY é válido para o caso de drenagem radial.

O método de TAN é o único que não se baseia nas teorias clássicas de TERZAGHI ou BARRON, sendo aplicável a quaisquer condições de drenagem apenas para o cálculo de recalque final, ocorrendo simultaneamente com o recalque secundário.

O método de ASAOKA é o mais geral dos métodos descritos neste capítulo, permitindo o cálculo tanto do recalque final, dos coeficientes de adensamento, assim como do recalque secundário e podendo ser aplicável tanto para a condição de adensamento vertical como para a condição de adensamento radial.

III.10.2. Outros métodos existentes

Outros métodos além dos descritos aqui têm sido propostos na literatura. Cita-se por exemplo o método de ESCARIO e URIEL^[19] para o cálculo do coeficiente de adensamento na condição de drenagem radial c_h . Uma desvantagem deste método é requerer o recalque por adensamento a tempo infinito para o cálculo de c_h . O método de SCOTT^[41] entretanto é tão geral quanto o de ASAOKA, permitindo o cálculo do recalque final e do coeficiente de adensamento vertical ou horizontal, conforme o caso. Estes e outros métodos não serão utilizados aqui para não tornar por demais extenso este trabalho. Pode se citar também o método de GOULD^[22].

CAPÍTULO IV

APLICAÇÃO DAS TEORIAS DE CÁLCULO DE RECALQUES E DE COEFICIENTES DE ADENSAMENTO

IV.1. INTRODUÇÃO

Este capítulo contém os cálculos dos recalques iniciais de adensamento e finais e dos coeficientes de adensamento vertical e horizontal do Aterro Experimental II efetuados pelos métodos descritos no capítulo anterior.

A análise realizada utilizou os dados obtidos pelas placas de recalques instaladas na base do aterro e localizadas no centro de cada seção. Estes dados, provenientes da instrumentação de campo, foram reunidos em um arquivo implantado em microcomputador PC-XT compatível, e que pode ser acessado pelo "Programa Sarapuí". O programa traça curvas de recalque ao longo do tempo e consta do Apêndice B deste trabalho.

O quadro IV.1 resume os dados necessários à aplicação dos diversos métodos e os parâmetros que foram obtidos.

Quadro IV.1 - Resumo dos Métodos de Cálculo

(Dados necessários e parâmetros obtidos nestes cálculos)

MÉTODO DE CÁLCULO	DADOS NECESSÁRIOS AO CÁLCULO	PARÂMETROS OBTIDOS					
		U_h, U_v	s_o	$s^{(\infty)}$	s_f	c_v	c_h
Teoria da Elasticidade para cálculo de recalque inicial	Geometria do Problema, Módulo de Elasticidade, Coeficiente de Poisson.	-	X	-	-	-	-
ELLSTEIN	Leituras de Recalques ao longo do Tempo.	X	-	X	-	X	-
LONG e CAREY	Leituras de Recalques ao longo do Tempo.	X	-	-	X	-	X
TAN	Leituras de Recalques ao longo do Tempo.	X	-	-	X	-	-
ASAOKA por MAGNAN e DEROY	Leituras de Recalques ao longo do Tempo.	X	-	-	X	X	X
Convencional de Recalques Finais por Adensamento	Geometria do Problema, Parâmetros de Compressibilidade.	X	-	X	-	-	-
TERZAGHI/BARRON ^[1]	Geometria do Problema, Coeficientes de Adensamento ^[1] .	X	-	-	-	-	-

Nota: ^[1] c_v para TERZAGHI e c_h para BARRON

IV.2. DADOS NECESSÁRIOS À ANÁLISE

Um resumo dos dados necessários à análise de recalques e coeficientes de adensamento é apresentado na Tabela IV.1, dados esses obtidos de COLLET^[10] e do levantamento de dados realizados pela equipe do IPR.

As tabelas IV.2 à IV.9 mostram os dados tempo-recalque das placas de recalques centrais obtidas pelo "Programa Sãrapuí" para o traçado das curvas de evolução dos recalques ao longo do tempo. Estes dados foram utilizados para os cálculos de recalques finais e de coeficientes de adensamento vertical e horizontal através dos métodos descritos no Capítulo III. As figuras IV.1 a IV.13 apresentam também esses dados através das curvas recalque-tempo juntamente com a história de carregamento adotada. Estas figuras mostram os pontos de cálculo utilizados nos métodos de ELLSTEIN, LONG e CAREY, e TAN.

A tabela IV.10(a) apresenta, para as diversas seções do aterro, os valores das funções n , baseada na equação (III.4.11) e $f(n)$, baseada na equação (III.4.15) e os valores dos raios de influência (r_e) obtidos pela equação (III.4.2). Os valores dos espaçamentos entre os drenos (s) e dos raios efetivos dos drenos de areia ou raios equivalentes dos drenos pré-fabricados (r_w), necessários ao cálculo das funções acima citadas foram apresentados na Tabela II.1.

A Tabela IV.10(b) apresenta, para seção D os valores das funções n , $f(n)$ e r_e com base nas equações citadas no parágrafo anterior, calculados para r_w de 25 e 30 cm e para

TABELA IV.1. DADOS NECESSÁRIOS ÀS ANÁLISES DE RECALQUE E COEFICIENTES DE ADENSAMENTO DO ATERRO EXPERIMENTAL II

S E C Ç Ã O	ESPESSURA DA CAMADA DE ARGILA - 2H (m)	PESO ESPECÍFICO TOTAL DA ARGILA (KN/m^3)	1ª FASE DE CARREGAMENTO										2ª FASE DE CARREGAMENTO				
			1ª ETAPA DE CARREGAMENTO					2ª ETAPA DE CARREGAMENTO					3ª ETAPA DE CARREGAMENTO				
			DATA DO INÍCIO DA CONSTRUÇÃO	DATA DO FINAL DA CONSTRUÇÃO	TEMPO DE CONSTRUÇÃO (DIAS)	BESO ESPECÍFICO TOTAL DO ATERRO ^[1] (KN/m^3)	ALTURA DO ATERRO (m)	DATA DO INÍCIO DA CONSTRUÇÃO	DATA DO FINAL DA CONSTRUÇÃO	TEMPO DE CONSTRUÇÃO (DIAS)	PESO ESPECÍFICO TOTAL DO ATERRO (KN/m^3)	ALTURA DO ATERRO (m)	DATA DO INÍCIO DA CONSTRUÇÃO	DATA DO FINAL DA CONSTRUÇÃO	TEMPO DE CONSTRUÇÃO (DIAS)	PESO ESPECÍFICO TOTAL DO ATERRO (KN/m^3)	ALTURA DO ATERRO (m)
A	10,50	13,08	20/11/80	28/01/81	69	19,30	1,05	30/08/81	20/10/81	51	19,30	1,80	- ^[2]	-	-	-	-
B	10,50	13,08	26/12/80	28/01/81	33	19,80	0,80	16/08/81	20/10/81	65	19,40	1,80	15/01/86	27/01/86	12	15,50	3,50
C	10,50	13,08	23/12/80	30/01/81	38	19,70	0,65	22/08/81	30/10/81	69	19,50	1,80	14/01/86	24/01/86	10	15,80	3,50
D	10,50	13,08	22/12/80	30/01/81	39	19,70	0,65	21/08/81	02/11/81	73	19,50	2,10	16/01/86	24/01/86	08	16,00	3,80
E	10,20	13,08	12/12/80	28/12/80	16	20,20	0,40	08/08/81	30/11/81	114	19,50	1,90	17/01/86	25/01/86	08	14,80	3,60
F	10,00	13,08	20/12/80	26/01/81	37	19,80	0,70	12/08/81	16/12/81	126	19,40	1,90	18/01/86	25/01/86	07	16,20	3,60
G	9,00	13,08	08/01/81	30/01/81	22	19,50	0,90	26/08/81	07/07/82	316	19,50	1,90	21/01/86	27/01/86	06	16,80	3,60

[1] O peso específico total do aterro para a primeira etapa de carregamento é a média ponderada entre o peso específico total do material do colchão de areia e o peso específico total do material da jazida.

[2] A seção A foi construída somente até 1,80m não tendo, portanto, a 3ª etapa de carregamento ou 2ª fase de carregamento.

**TABELA IV.2. LEITURAS DE RECALQUES REALIZADAS NA PLACA DE
RECALQUE R3 DA SEÇÃO A E RESPECTIVAS DATAS**

DATA	$\varepsilon(t)$ (mm)	$\sum \varepsilon(t)$ (mm)	DATA	$s(t)$ mm	$\sum s(t)$ (mm)
24/11/80	0	0	25/01/82	7	362
01/12/80	35	35	01/02/82	4	366
17/12/80	1	36	08/02/82	6	372
05/01/81	10	46	15/02/82	5	377
14/01/81	2	48	25/02/82	11	388
21/01/81	0	48	01/03/82	2	390
26/01/81	12	60	08/03/82	5	395
30/01/81	4	64	15/03/82	8	403
02/02/81	5	69	22/03/82	5	408
05/02/81	3	72	29/03/82	5	413
18/02/81	14	86	05/04/82	3	416
25/02/81	9	95	13/04/82	3	419
05/03/81	6	101	03/05/82	14	433
09/03/81	5	106	26/05/82	18	451
13/03/81	3	109	16/06/82	11	462
18/03/81	6	115	07/07/82	15	477
23/03/81	2	117	02/08/82	15	492
30/03/81	1	118	30/08/82	15	507
02/04/81	5	123	27/09/82	10	517
13/04/81	6	129	25/11/82	27	544
23/04/81	6	135	18/01/83	22	566
05/05/81	5	140	12/04/83	28	594
11/05/81	5	145	16/08/83	45	639
26/05/81	8	153	11/06/84	88	727
01/06/81	3	156	18/04/85	68	795
09/06/81	5	161	28/12/85	49	844
23/06/81	8	169	29/01/86	2	846
24/08/81	27	196	05/02/86	2	848
01/10/81	24	220	14/03/86	2	850
13/10/81	2	222	18/04/86	6	856
26/10/81	24	246	07/05/86	3	859
26/10/81	0	246	04/06/86	4	863
09/11/81	26	272	10/07/86	7	870
19/11/81	17	289	19/08/86	7	877
24/11/81	6	295	14/11/86	11	888
08/12/81	15	310	23/01/87	16	904
11/01/82	40	350	23/04/87	21	925
18/01/82	5	355	17/07/87	12	937

TABELA IV.3. LEITURAS DE RECALQUES REALIZADAS NA PLACA

DE RECALQUE R3 DA SEÇÃO B E RESPECTIVAS DATAS

DATA	$s(t)$ (mm)	$\sum s(t)$ (mm)	DATA	$s(t)$ (mm)	$\sum s(t)$ (mm)
05/01/81	0	0	01/03/82	7	452
19/01/81	18	18	08/03/82	4	456
30/01/81	13	31	15/03/82	7	463
02/02/81	4	35	22/03/82	5	468
17/03/81	57	92	29/03/82	9	477
18/03/81	0	92	05/04/82	3	480
20/03/81	1	93	13/04/82	4	484
23/03/81	11	104	03/05/82	22	506
30/03/81	9	113	26/05/82	21	527
02/04/81	4	117	16/06/82	22	549
07/04/81	5	122	07/07/82	19	568
13/04/81	6	128	02/08/82	24	592
23/04/81	14	142	30/08/82	22	614
05/05/81	5	147	27/09/82	20	634
11/05/81	4	151	25/11/82	46	680
26/05/81	11	162	18/01/83	30	710
01/06/81	1	163	12/04/83	47	757
09/06/81	7	170	16/08/83	62	819
15/06/81	1	171	11/06/84	128	947
23/06/81	5	176	18/04/85	81	1028
17/08/81	22	198	11/01/86	70	1098
27/08/81	5	203	15/01/86	4	1102
01/09/81	0	203	16/01/86	8	1110
01/10/81	36	239	22/01/86	11	1121
13/10/81	7	246	22/01/86	0	1121
03/11/81	69	315	29/01/86	42	1163
03/11/81	0	315	05/02/86	24	1187
09/11/81	18	333	14/03/86	91	1278
19/11/81	12	345	18/04/86	65	1343
24/11/81	7	352	07/05/86	31	1374
07/12/81	13	365	04/06/86	50	1424
11/01/82	38	403	10/07/86	52	1476
18/01/82	4	407	19/08/86	53	1529
25/01/82	8	415	14/11/86	96	1625
01/02/82	7	422	23/01/87	69	1694
08/02/82	5	427	23/04/87	59	1753
15/02/82	6	433	17/07/87	50	1803
25/02/82	12	445			

TABELA IV.4. LEITURAS DE RECALQUES REALIZADAS NA PLACA

DE RECALQUE R3 DA SEÇÃO C E RESPECTIVAS DATAS

DATA	$s(t)$ (mm)	$\sum s(t)$ (mm)	DATA	$s(t)$ (mm)	$\sum s(t)$ (mm)
23/12/80	0	0	05/04/82	3	485
05/01/81	2	2	13/04/82	5	490
23/01/81	14	16	03/05/82	20	510
30/01/81	1	17	26/05/82	12	522
02/02/81	3	20	16/06/82	30	552
05/02/81	7	27	07/07/82	17	569
19/02/81	1	28	02/08/82	22	591
25/02/81	1	29	30/08/82	19	610
04/05/81	61	90	27/09/82	19	629
20/08/81	97	187	25/11/82	42	671
27/08/81	3	190	18/01/83	27	698
01/09/81	0	190	16/08/83	98	796
02/10/81	23	213	11/06/84	118	914
13/10/81	15	228	18/04/85	74	988
09/11/81	61	289	28/12/85	60	1048
17/11/81	29	318	14/01/86	4	1052
17/11/81	0	318	15/01/86	12	1064
24/11/81	14	332	23/01/86	13	1077
07/12/81	23	355	23/01/86	0	1077
11/01/82	45	400	29/01/86	31	1108
18/01/82	6	406	05/02/86	28	1136
25/01/82	10	416	25/02/86	80	1216
01/02/82	6	422	14/03/86	136	1352
08/02/82	7	429	18/04/86	63	1415
15/02/82	6	435	07/05/86	33	1448
25/02/82	14	449	04/06/86	47	1495
01/03/82	7	456	10/07/86	48	1543
08/03/82	4	460	19/08/86	49	1592
15/03/82	6	466	14/11/86	83	1675
22/03/82	7	473	23/04/87	119	1794
29/03/82	9	482	17/07/87	46	1840

**TABELA IV.5. LEITURAS DE RECALQUES REALIZADAS NA PLACA DE
RECALQUE R3 DA SEÇÃO D E RESPECTIVAS DATAS**

D A T A	$s(t)$ (mm)	$\sum s(t)$ (mm)	D A T A	$s(t)$ (mm)	$\sum s(t)$ (mm)
23/12/80	0	0	07/07/82	22	871
05/01/81	0	0	02/08/82	32	903
23/01/81	17	17	30/08/82	28	931
26/01/81	1	18	27/09/82	24	955
02/02/81	12	30	25/11/82	52	1007
21/08/81	202	232	18/01/83	34	1041
21/08/81	0	232	12/04/83	47	1088
27/08/81	5	237	16/08/83	65	1153
01/09/81	0	237	11/06/84	106	1259
02/10/81	43	280	18/04/85	62	1321
13/10/81	26	306	28/12/85	51	1372
24/11/81	99	405	11/01/86	2	1374
07/12/81	59	464	16/01/86	2	1376
11/01/82	122	586	17/01/86	4	1380
18/01/82	12	598	23/01/86	11	1391
25/01/82	20	618	23/01/86	0	1391
01/02/82	13	631	29/01/86	39	1430
08/02/82	15	646	05/02/86	31	1461
15/02/82	14	660	25/02/86	63	1524
25/02/82	23	683	14/03/86	45	1569
01/03/82	8	691	18/04/86	72	1641
08/03/82	12	703	07/05/86	35	1676
15/03/82	12	715	04/06/86	55	1731
22/03/82	13	728	10/07/86	52	1783
29/03/82	12	740	19/08/86	56	1839
05/04/82	6	746	14/11/86	90	1929
13/04/82	8	754	23/01/87	67	1996
03/05/82	35	789	23/04/87	44	2040
26/05/82	32	821	17/07/87	42	2082
16/06/82	28	849			

TABELA IV.6. LEITURAS DE RECALQUES REALIZADAS NA PLACA

DE RECALQUE R3^[1] DA SEÇÃO E E RESPECTIVAS DATAS

D A T A	s(t) (mm)	$\sum s(t)$ (mm)	D A T A	s(t) (mm)	$\sum s(t)$ (mm)
22/12/80	0	0	18/01/82	9	313
06/01/81	6	6	25/01/82	9	322
13/01/81	1	7	01/02/82	9	331
26/01/81	8	15	08/02/82	13	344
02/02/81	0	15	15/02/82	3	347
06/02/81	2	17	25/02/82	17	364
13/02/81	1	18	01/03/82	4	368
16/02/81	1	19	09/03/82	10	378
20/02/81	1	20	15/03/82	9	387
23/02/81	2	22	22/03/82	7	394
16/03/81	14	36	29/03/82	10	404
19/03/81	2	38	05/04/82	2	406
13/04/81	2	40	13/04/82	8	414
12/05/81	0	40	03/05/82	24	438
09/06/81	1	41	26/05/82	22	460
23/06/81	1	42	16/06/82	24	484
13/08/81	4	46	07/07/82	21	505
24/08/81	0	46	02/08/82	26	531
04/09/81	38	84	30/08/82	24	555
02/10/81	52	137	27/09/82	21	576
13/10/81	21	158	25/11/82	52	628
09/11/81	41	199	19/01/83	34	662
18/11/81	13	212	12/04/83	56	718
18/11/81	0	212	16/08/83	60	778
24/11/81	4	216	11/06/84	145	923
07/12/81	16	232	18/04/85	93	1016
11/01/82	72	304			

[1] Este instrumento foi danificado por ocasião da construção do aterro na 2ª fase de carregamento sendo, desta forma, a análise da referida fase realizada pelas leituras de placa de recalque R12 também localizada no eixo longitudinal do aterro, próxima ao centro da seção.

**TABELA IV.7. LEITURAS DE RECALQUES REALIZADAS NA PLACA DE
RECALQUE R12^[1] DA SEÇÃO E E RESPECTIVAS DATAS**

DATA	s(t) (mm)	$\sum s(t)$ (mm)	DATA	s(t) (mm)	$\sum s(t)$ (mm)
22/12/80	0	0	15/03/82	9	350
30/12/80	24	24	22/03/82	13	363
06/01/81	2	26	29/03/82	2	365
13/01/81	2	28	05/04/82	1	366
26/01/81	6	34	13/04/82	9	375
30/01/81	1	35	03/05/82	19	394
02/02/81	0	35	26/05/82	20	414
06/02/81	2	37	16/06/82	25	439
13/02/81	1	38	07/07/82	19	458
31/03/81	1	39	02/08/82	25	483
02/04/81	1	40	30/08/82	23	506
22/04/81	1	41	27/09/82	20	526
06/05/81	1	42	25/11/82	51	577
12/05/81	2	44	19/01/83	35	612
26/05/81	2	46	12/04/83	53	665
15/06/81	1	47	16/08/83	67	732
06/08/81	1	48	11/06/84	142	874
13/08/81	3	51	18/04/85	94	968
17/08/81	0	51	28/12/85	77	1045
24/08/81	8	59	11/01/86	3	1048
04/09/81	30	89	17/01/86	7	1055
02/10/81	44	133	18/01/86	3	1058
13/10/81	23	156	24/01/86	11	1069
09/11/81	41	197	24/01/86	0	1069
18/11/81	12	209	29/01/86	32	1101
18/11/81	0	209	05/02/86	26	1127
24/11/81	4	213	25/02/86	52	1179
07/12/81	22	235	14/03/86	36	1215
11/01/82	45	280	18/04/86	65	1280
18/01/82	7	287	07/05/86	33	1313
25/01/82	7	294	04/06/86	43	1356
01/02/82	7	301	10/07/86	47	1403
08/02/82	12	313	19/08/86	53	1456
15/02/82	2	315	14/11/86	88	1544
25/02/82	14	329	23/01/87	64	1608
01/03/82	9	338	23/04/87	60	1668
09/03/82	3	341	17/07/87	54	1722

**TABELA IV.8. LEITURAS DE RECALQUES REALIZADAS NA PLACA DE RECALQUE R3 DA
SEÇÃO F E RESPECTIVAS DATAS**

D A T A	s(t) (mm)	$\sum s(t) \text{ (mm)}$	D A T A	s(t) (mm)	$\sum s(T) \text{ (mm)}$
30/12/80	0	0	07/07/82	25	525
06/01/81	1	1	02/08/82	28	553
13/01/81	22	23	30/08/82	25	578
26/01/81	8	31	27/09/82	22	600
30/01/81	3	34	25/11/82	52	652
06/02/81	5	39	19/01/83	35	687
10/02/81	4	43	12/04/83	53	740
13/02/81	2	45	16/08/83	71	811
16/02/81	4	49	11/06/84	131	942
20/02/81	2	51	18/04/85	95	1037
23/02/81	6	57	28/12/85	78	1115
06/03/81	5	62	11/01/86	4	1119
09/03/81	2	64	18/01/86	11	1130
19/03/81	3	67	20/01/86	4	1134
13/04/81	2	69	24/01/86	5	1139
12/05/81	6	75	24/01/86	0	1139
27/05/81	4	79	29/01/86	26	1165
02/06/81	1	80	05/02/86	23	1188
15/06/81	1	81	25/02/86	55	1243
23/06/81	1	82	14/03/86	35	1278
08/08/81	6	88	18/04/86	60	1338
10/08/81	0	88	07/05/86	27	1365
24/08/81	13	101	04/06/86	41	1406
02/10/81	54	155	10/07/86	50	1456
13/10/81	12	167	19/08/86	51	1507
10/11/81	35	202	14/11/86	85	1592
19/11/81	11	213	23/01/87	61	1653
19/11/81	0	213	23/04/87	49	1702
24/11/81	5	218	17/07/87	49	1751
16/06/82	282	500			

TABELA IV.9. LEITURAS DE RECALQUES REALIZADAS NA PLACA

DE RECALQUE R3 DA SEÇÃO G E RESPECTIVAS DATAS

D A T A	s(t) (mm)	$\sum s(t) \text{ (mm)}$	D A T A	s(t) (mm)	$\sum s(t) \text{ (mm)}$
30/01/81	0	0	01/03/82	5	230
05/02/81	35	35	15/03/82	5	235
10/02/81	8	43	22/03/82	3	238
13/02/81	1	44	29/03/82	6	244
16/02/81	2	46	03/05/82	13	257
20/02/81	6	52	26/05/82	9	266
23/02/81	2	54	16/06/82	12	278
06/03/81	7	61	25/06/82	5	283
16/03/81	2	63	15/07/82	32	315
23/03/81	4	67	02/08/82	21	336
31/03/81	3	70	30/08/82	25	361
03/04/81	3	73	27/09/82	21	382
13/04/81	4	77	25/11/82	42	424
22/04/81	2	79	19/01/83	30	454
28/04/81	1	80	13/04/83	42	496
13/05/81	4	84	16/08/83	53	549
18/05/81	3	87	11/06/84	114	663
27/05/81	2	89	18/04/85	82	745
02/06/81	2	91	28/12/85	67	812
10/06/81	3	94	25/01/86	11	823
15/06/81	2	96	25/01/86	0	823
11/08/81	11	107	29/01/86	19	842
13/10/81	12	119	05/02/86	27	869
10/11/81	52	171	25/02/86	46	915
19/11/81	6	177	14/03/86	26	941
24/11/81	3	180	18/04/86	38	979
24/11/81	0	180	07/05/86	23	1002
09/12/81	9	189	04/06/86	25	1027
11/01/82	14	203	10/07/86	26	1053
18/01/82	2	205	19/08/86	31	1084
25/01/82	5	210	14/11/86	49	1133
01/02/82	2	212	23/01/87	45	1178
08/02/82	2	214	23/04/87	32	1210
15/02/82	4	218	17/07/87	33	1243
25/02/82	7	225			

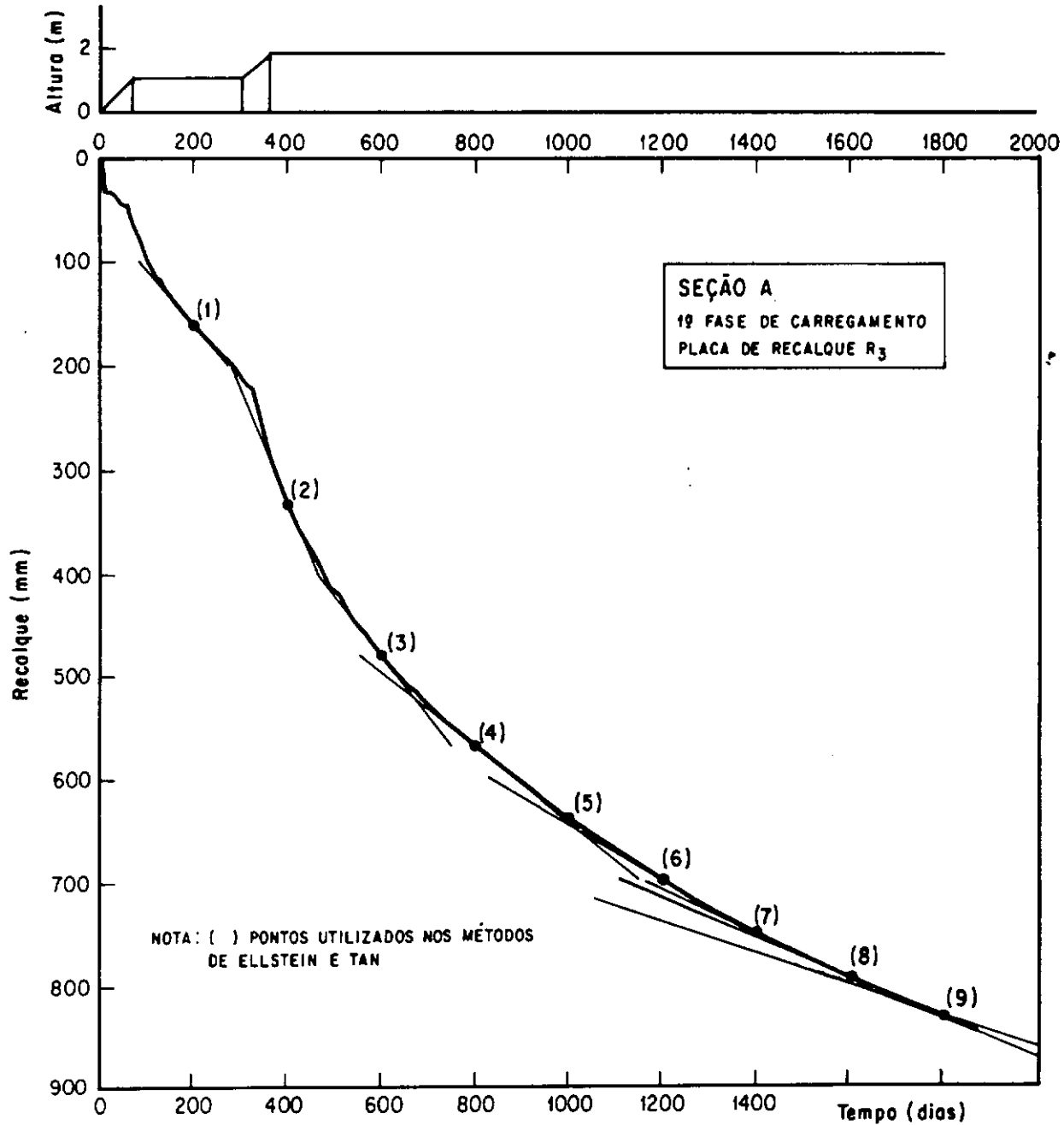


Figura IV.1 - Gráficos de variação de altura do aterro e do recalque com o tempo obtidos pelo programa Sarapuí.

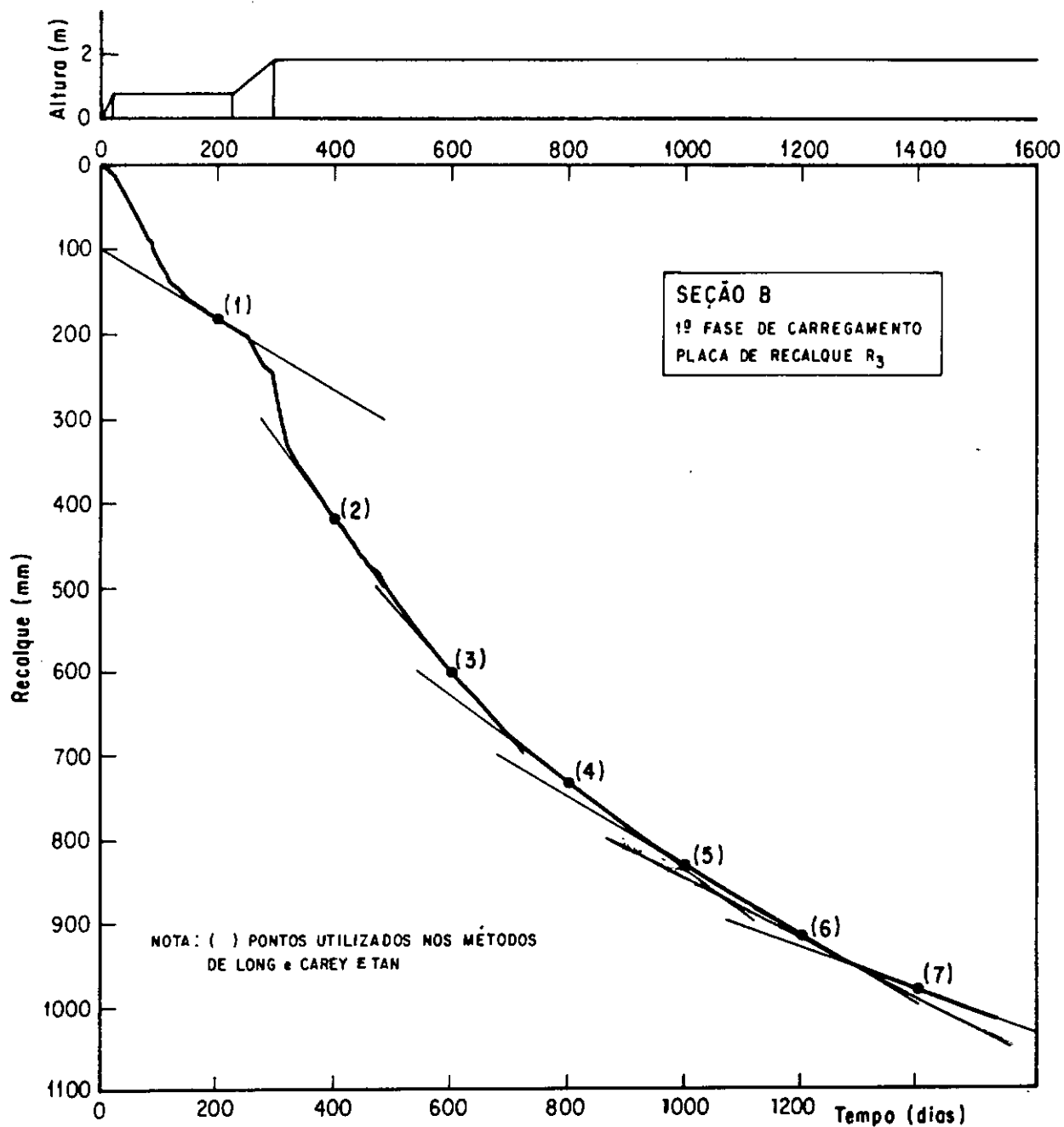


Figura IV.2 - Gráficos de variação de altura do aterro e do recalque com o tempo obtidos pelo programa Sarapuí.

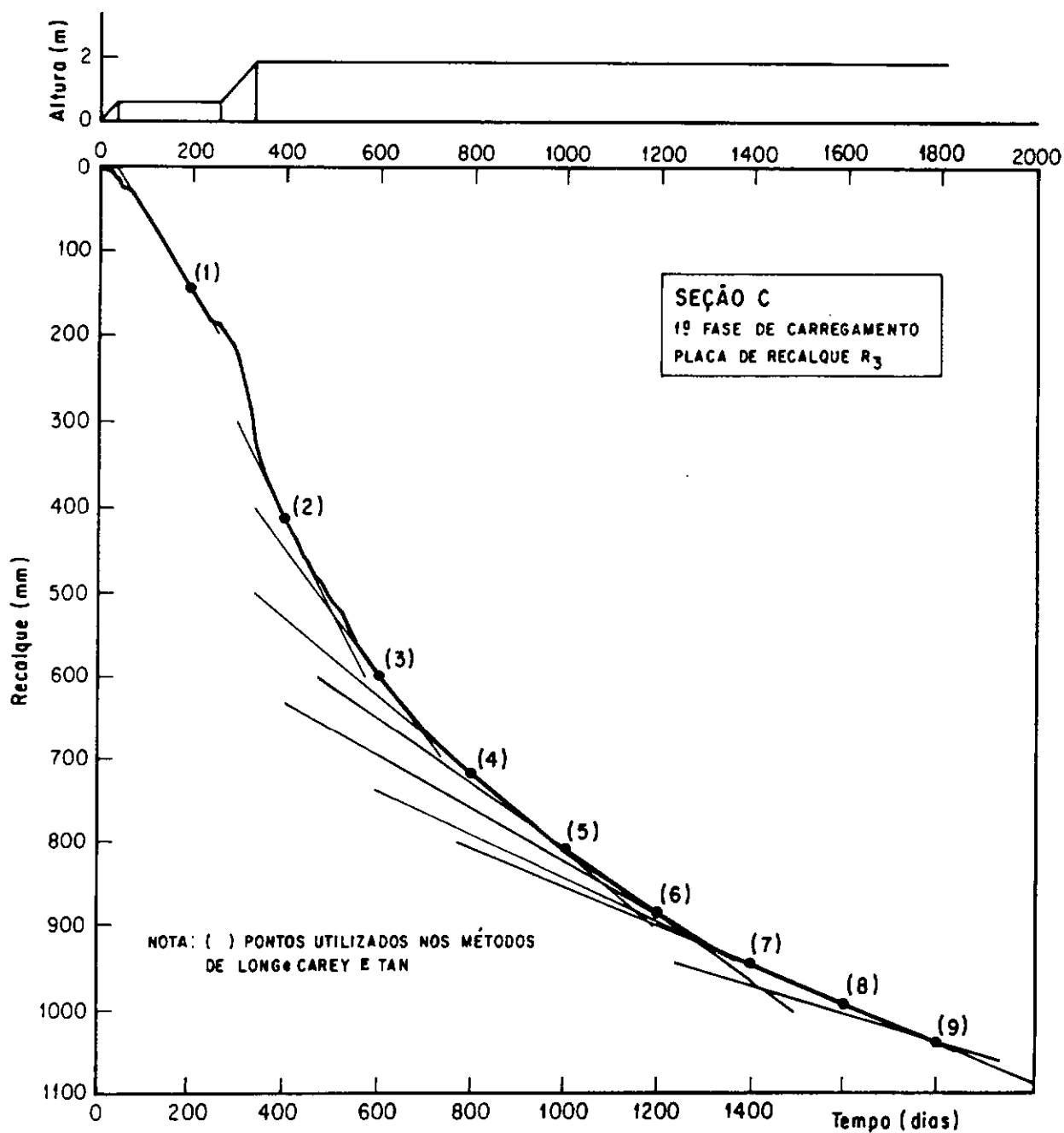


Figura IV.3- Gráficos de variação de altura do aterro e do recalque com o tempo obtidos pelo programa Sarapuí.

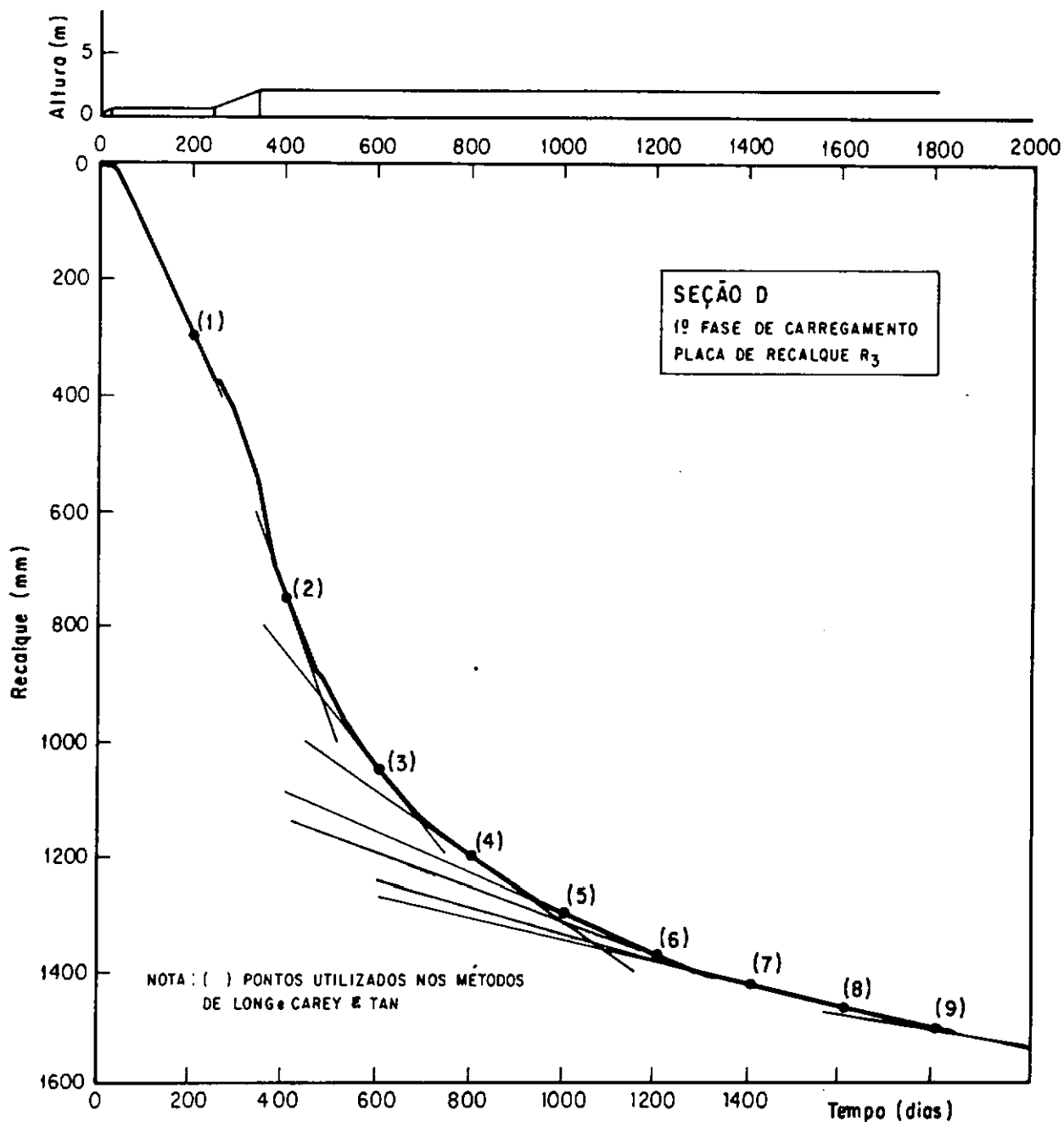


Figura IV 4 - Gráficos de variação de altura do aterro e do recalque com o tempo obtidos pelo programa Sarapuí.

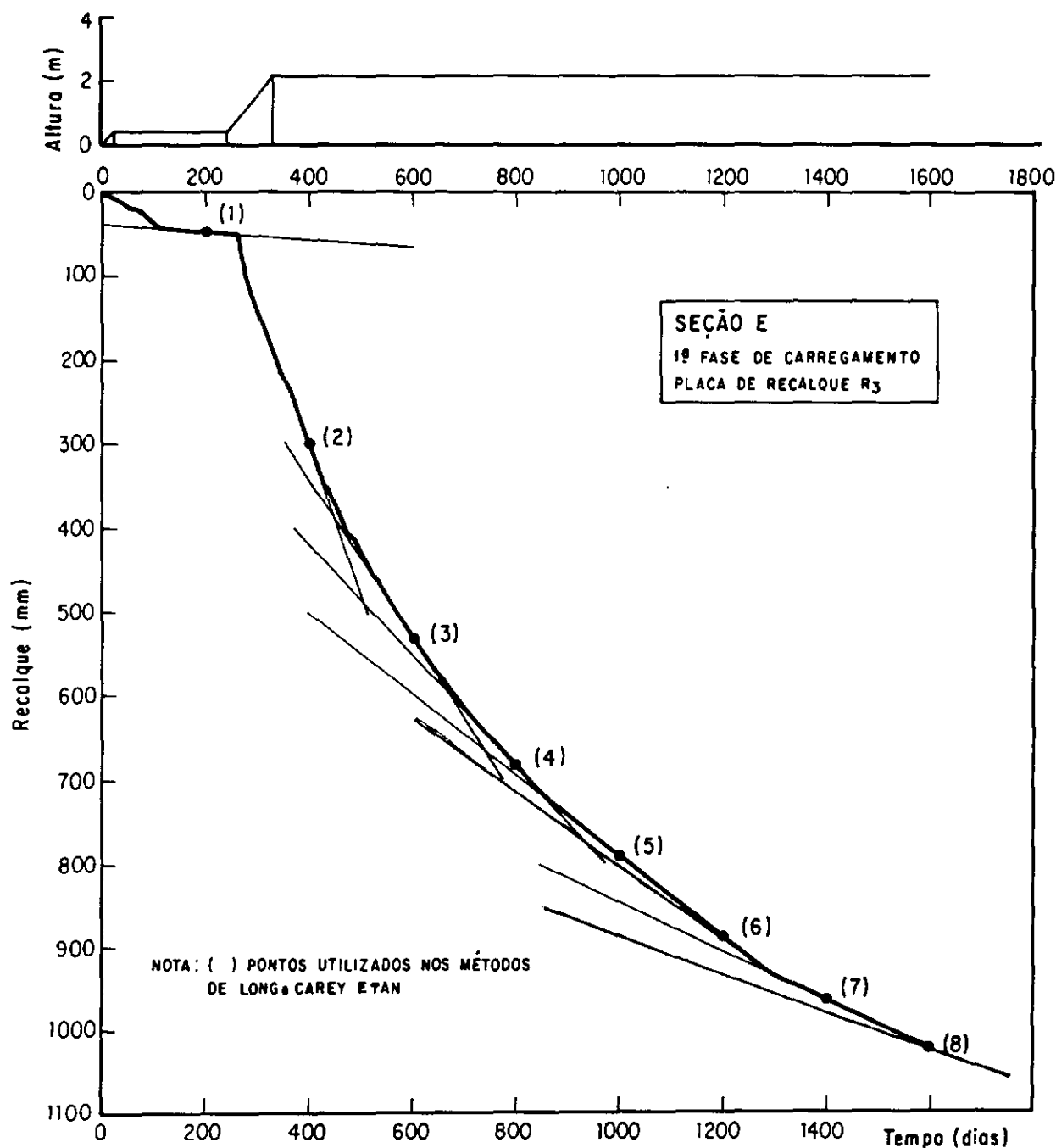


Figura IV.5 - Gráficos de variação de altura do aterro e do recalque com o tempo obtidos pelo programa Sarapu.

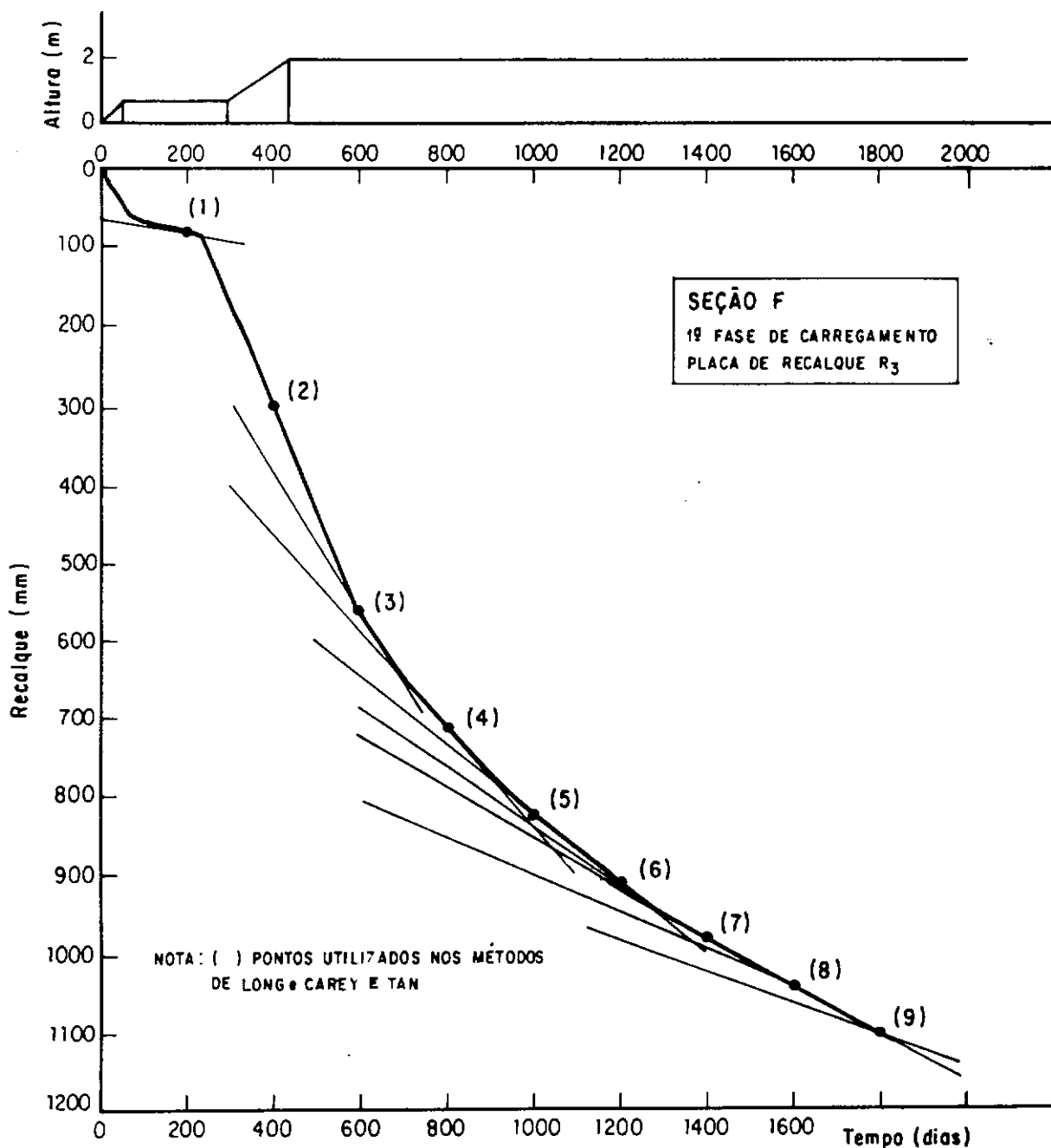


Figura IV.6 - Gráficos de variação de altura do aterro e do recalque com o tempo obtidos pelo programa Sarapuí.

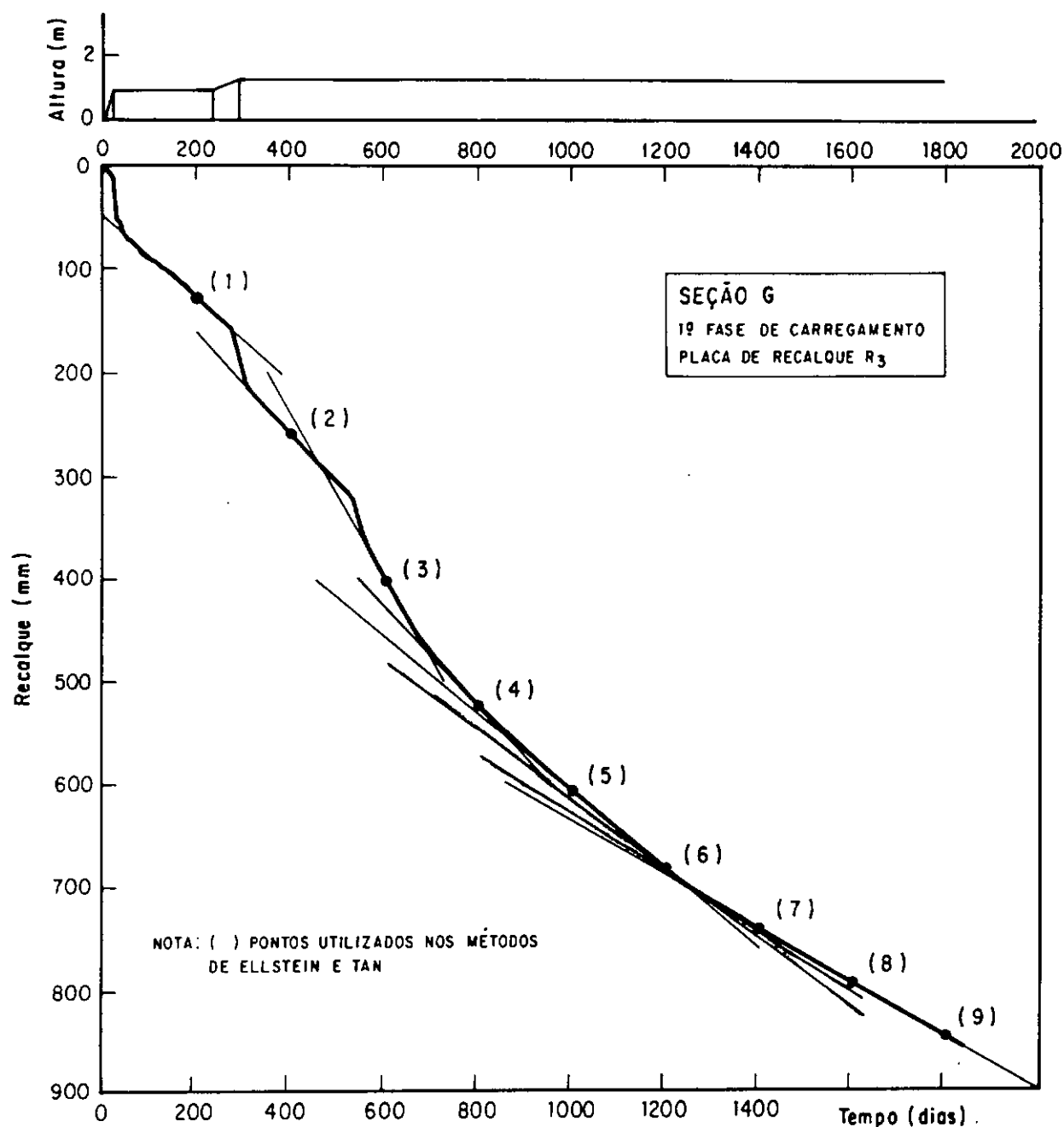


Figura IV.7- Gráficos de variação de altura do aterro e do recalque com o tempo obtidos pelo programa Sarapuí.

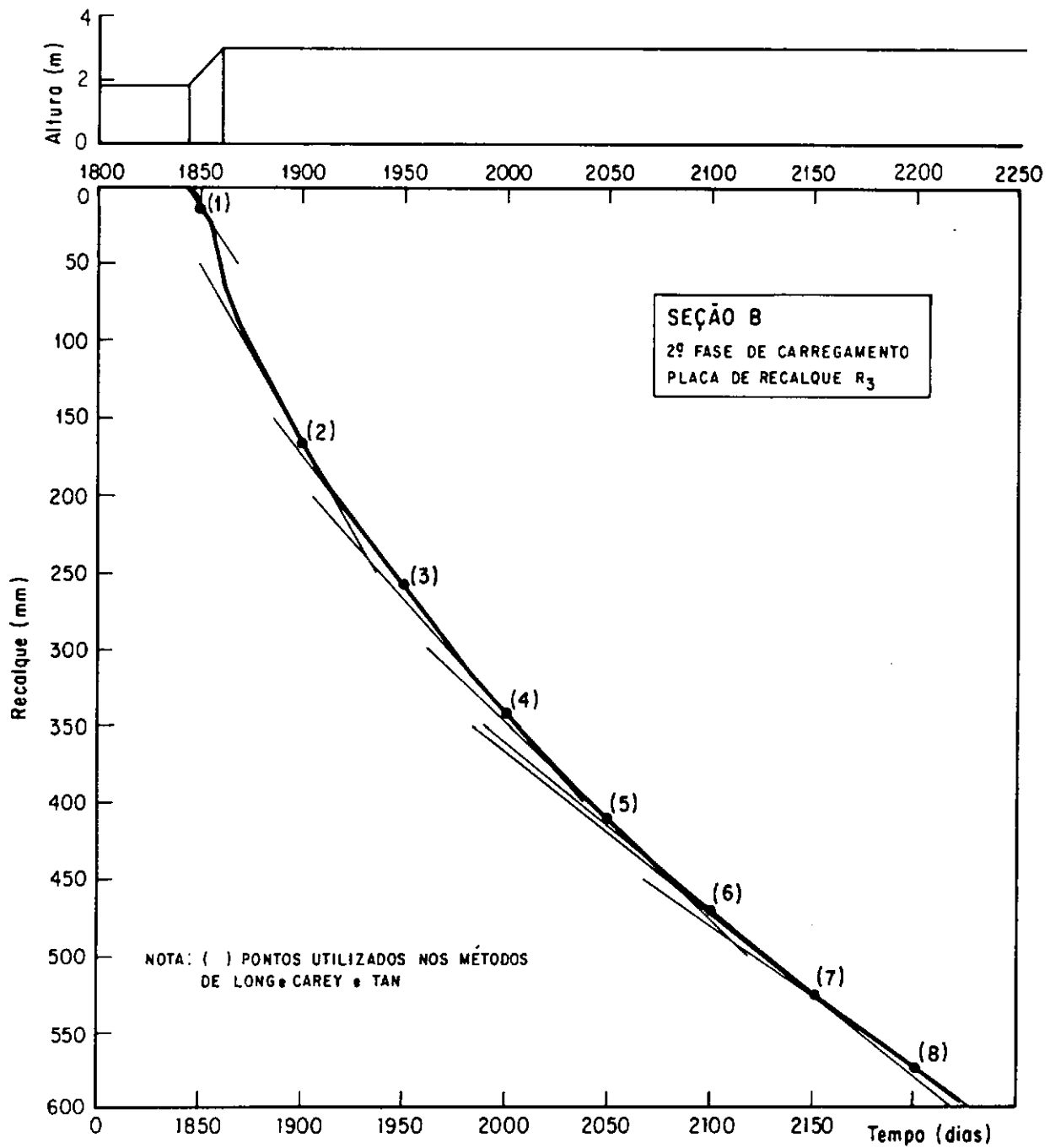


Figura IV.8 - Gráficos de variação de altura do aterro e do recalque com o tempo obtidos pelo programa Sarapuí.

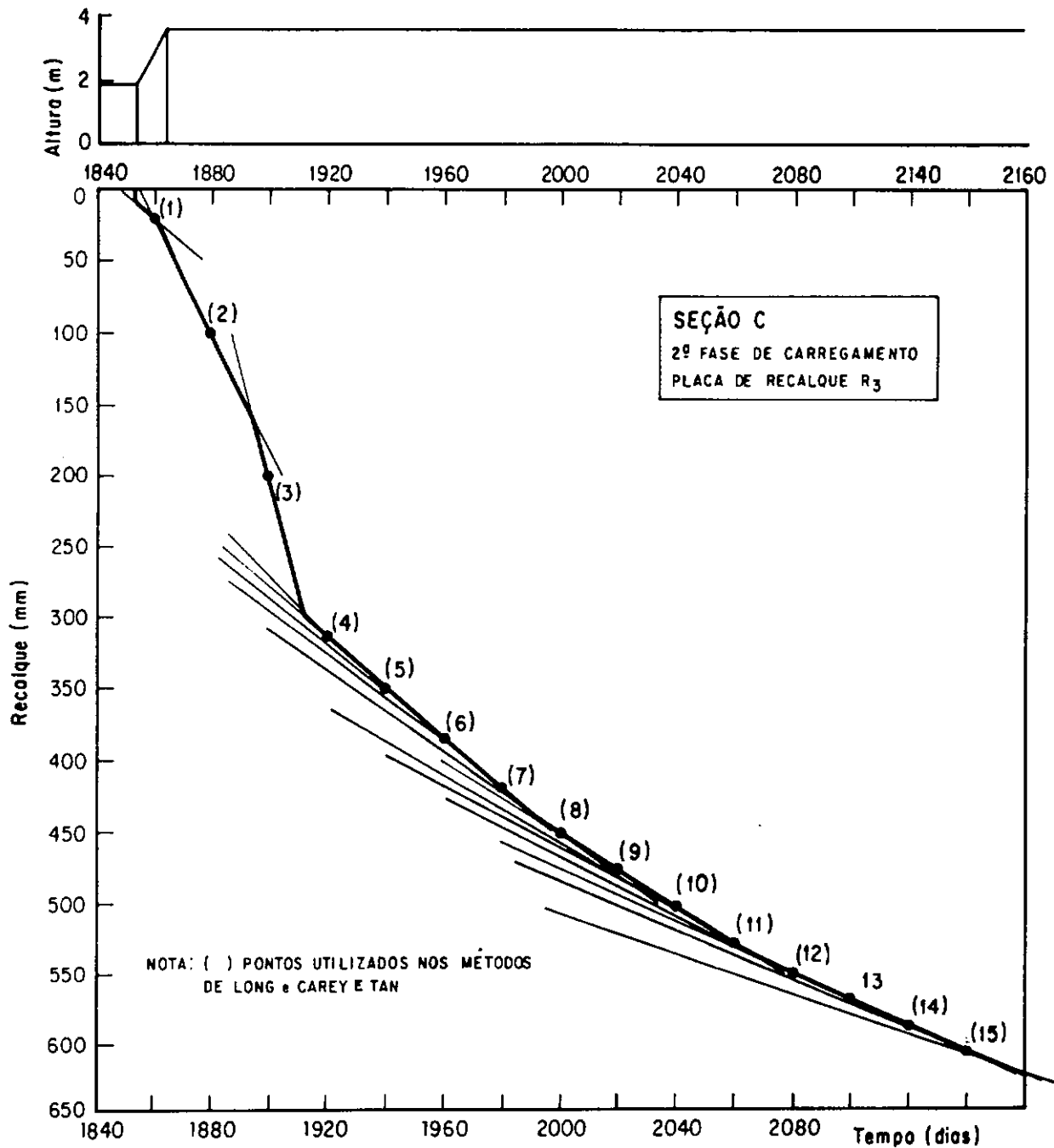


Figura IV.9 - Gráficos de variação de altura do aterro e do recalque com o tempo obtidos pelo programa Sarapuí.

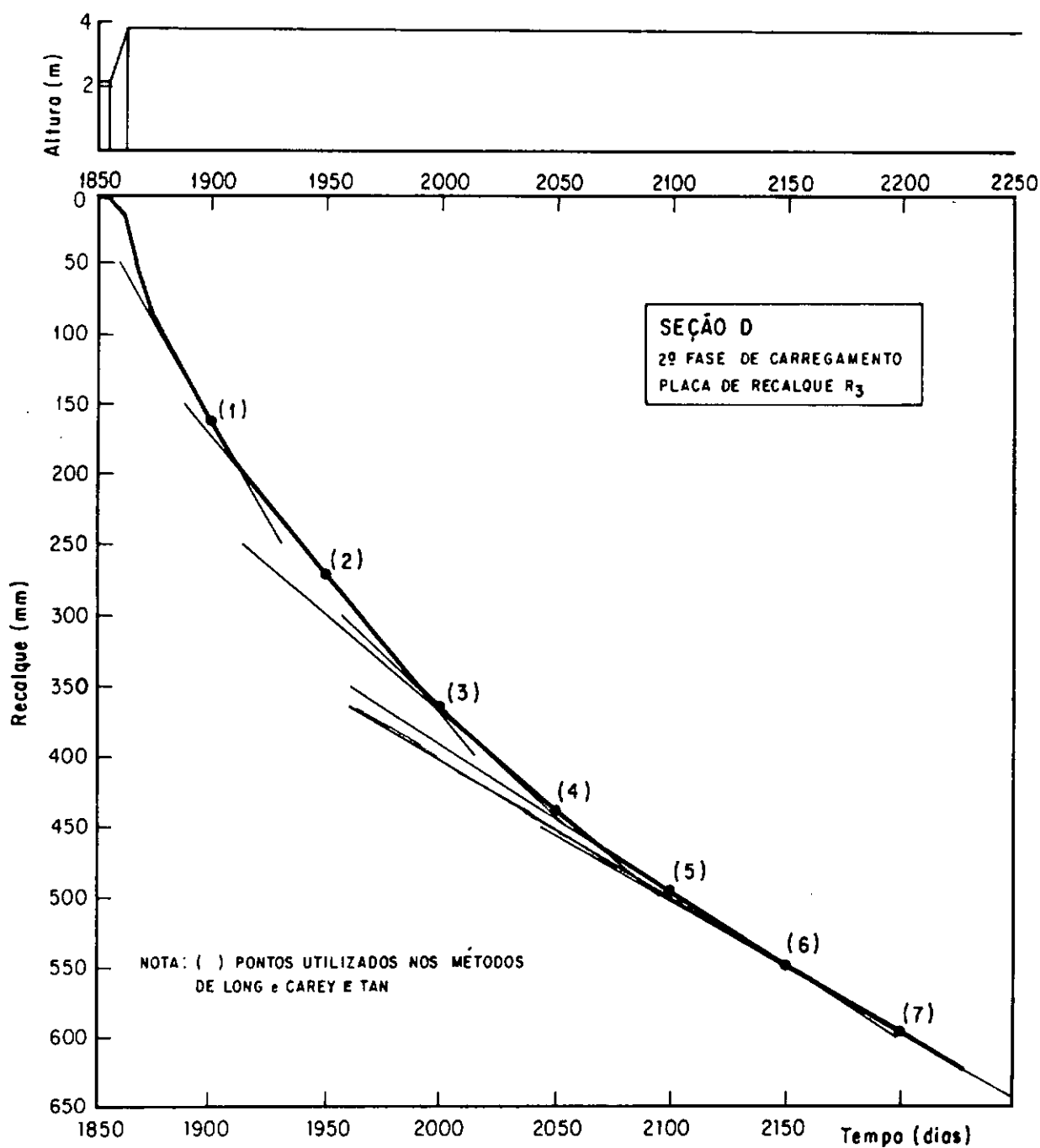


Figura IV. 10-Gráficos de variação de altura do aterro e do recalque com o tempo obtidos pelo programa Sarapuí.

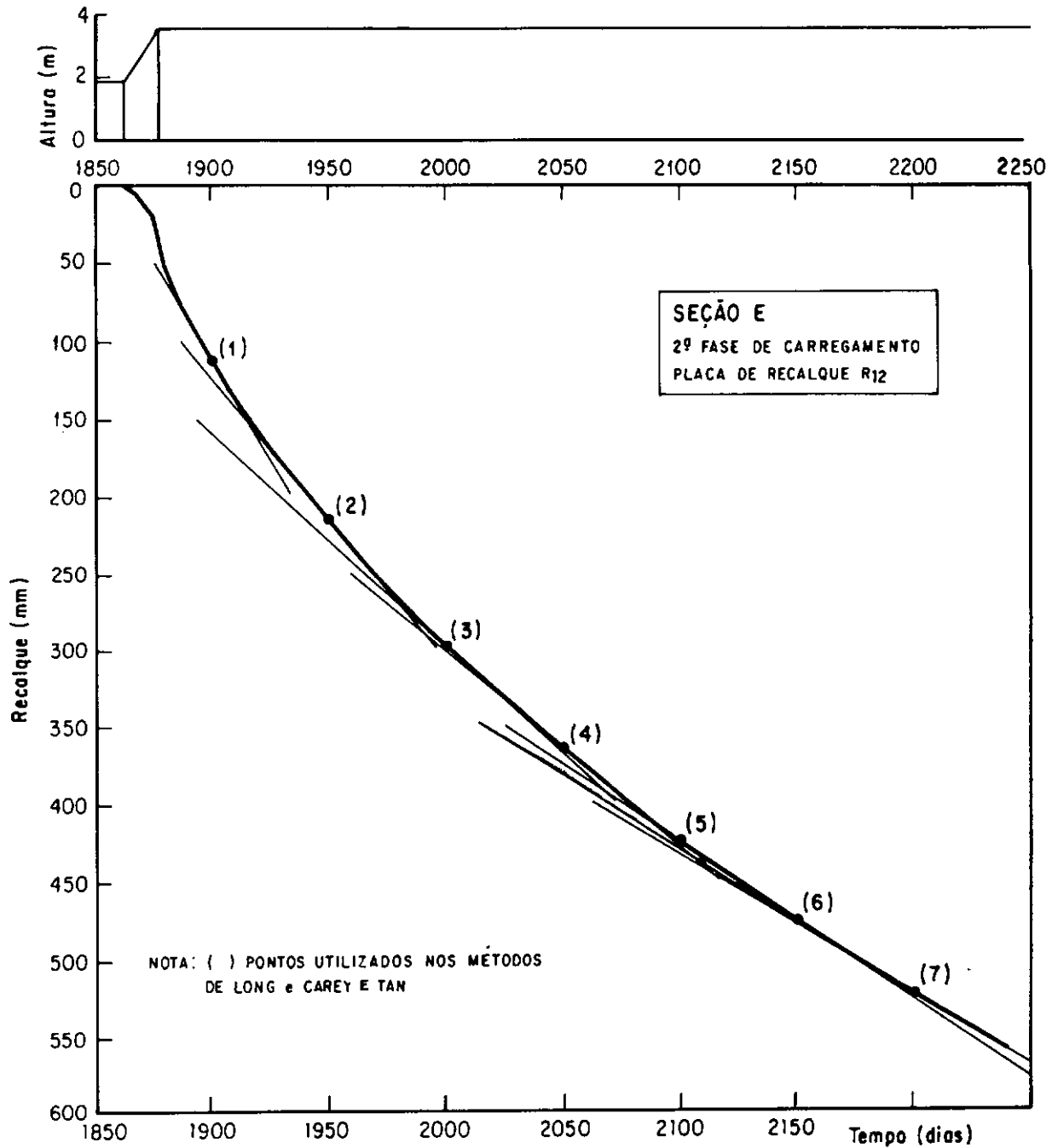


Figura IV.II - Gráficos de variação de altura do aterro e do recalque com o tempo obtidos pelo programa Sarapu.

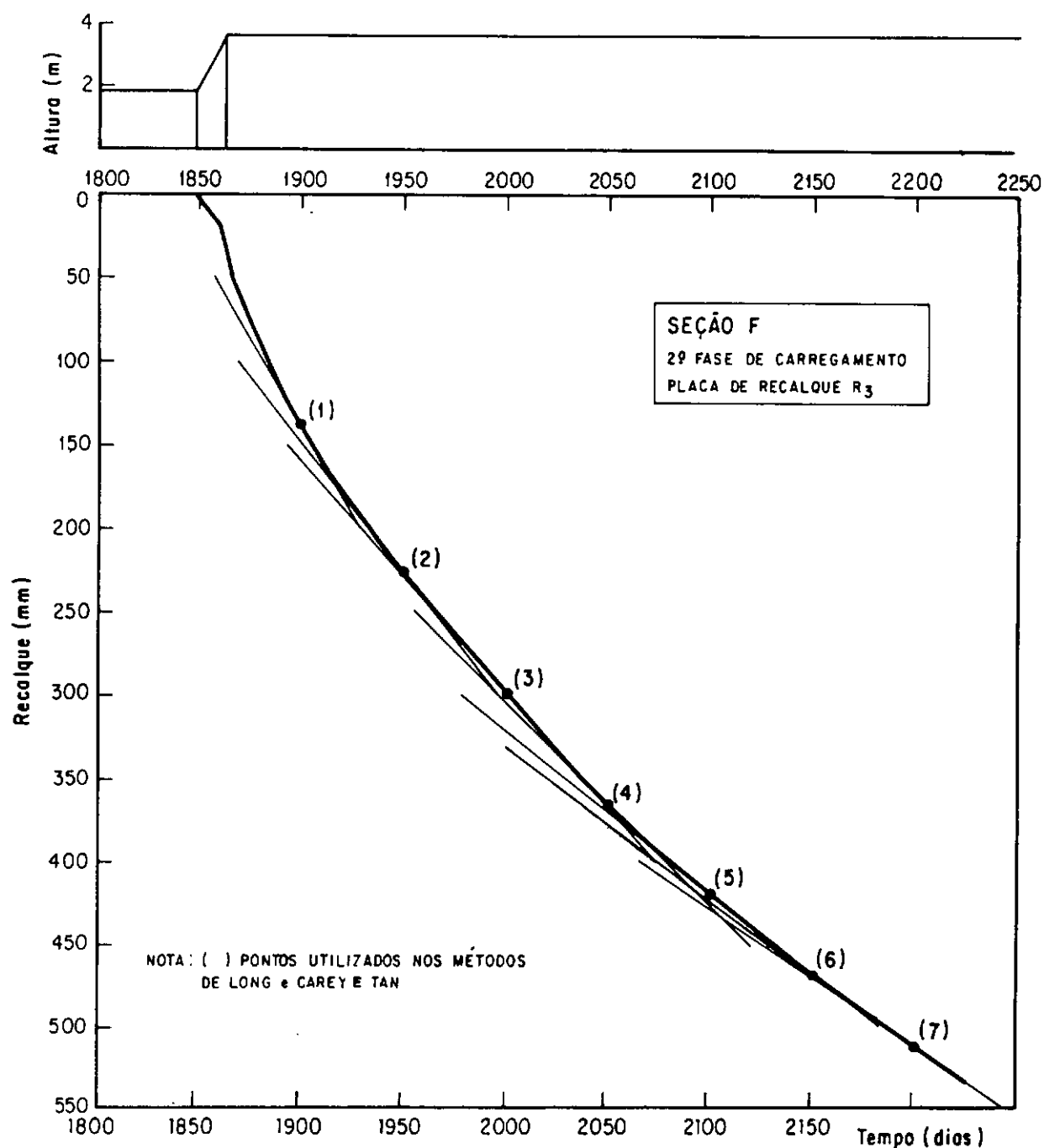


Figura IV.12- Gráficos de variação de altura do aterro e do recalque com o tempo obtidos pelo programa Sarapuí.

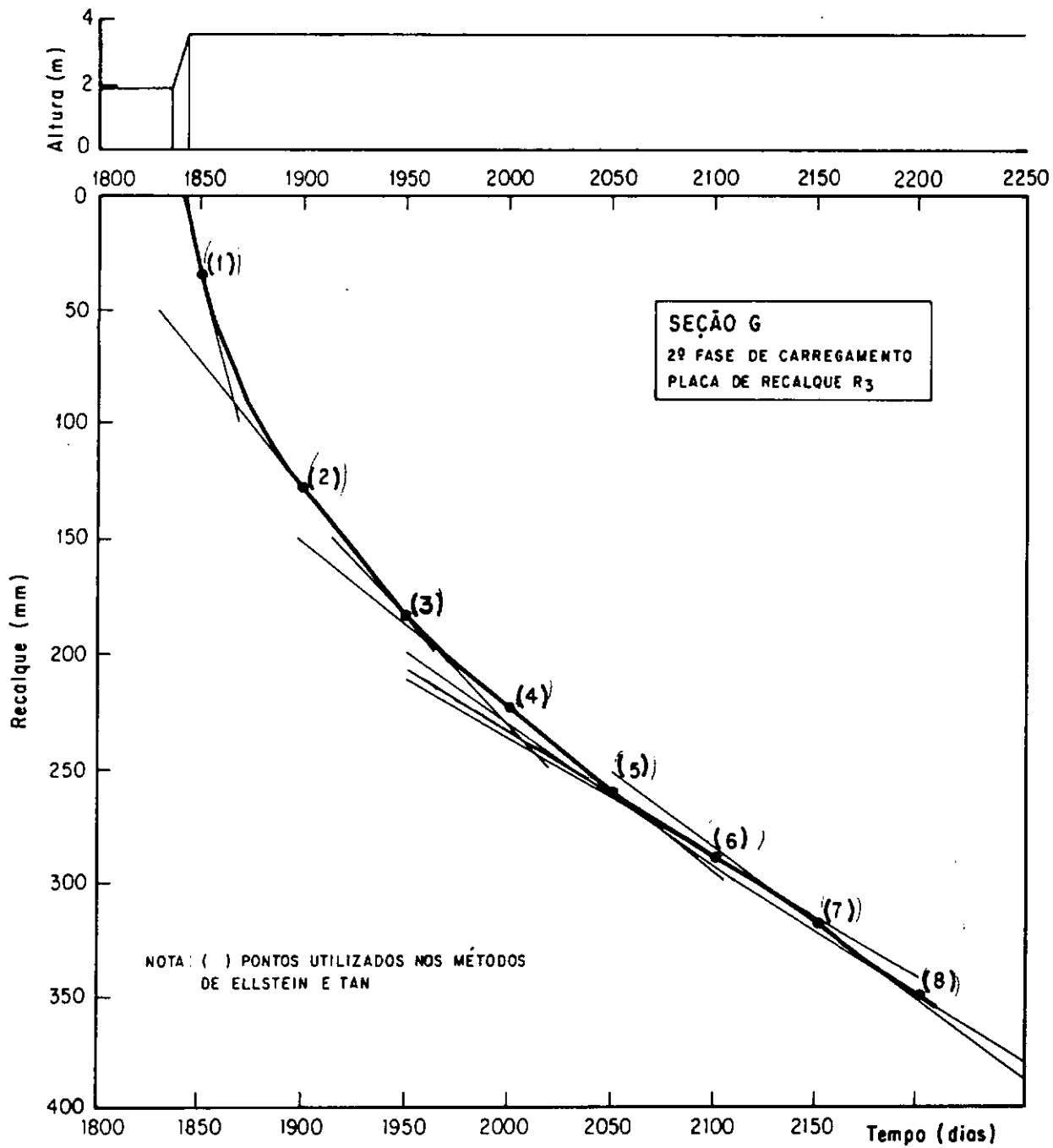


Figura IV.13-Gráficos de variação de altura do aterro e do recalque com o tempo obtidos pelo programa Sarapuí.

TABELA IV.10(a). VALORES DOS RAIOS DE INFLUÊNCIA DOS DRENOS E DAS FUNÇÕES n E $f(n)$ CORRESPONDENTES AOS RAIOS EFETIVOS DA TABELA II

SEÇÃO	r_e (cm)	n	$f(n)$
B	141,1	7,1	1,25
C	141,1	7,1	1,25
D	141,1	7,1	1,25
E	95,9	38,4	2,90
F	112,8	22,6	2,40

TABELA IV.10(b). VALORES DOS RAIOS DE INFLUÊNCIA DOS DRENOS E DAS FUNÇÕES n E $f(n)$ CORRESPONDENTES AOS VALORES DOS RAIOS EFETIVOS E COEFICIENTES DE FORMA ABAIXO DISCRIMINADOS

SEÇÃO	α	r_w (cm)	r_e (cm)	n	$f(n)$
D	-	25,0	141,1	5,64	1,04
D	-	30,0	141,1	4,70	0,89
E	0,5	1,64	95,8	58,5	3,32
F	0,5	3,41	112,8	33,1	2,75

as seções E e F, calculados para o valor do coeficiente de forma α , da equação (II.3.2) igual à 0,5.

IV.3. CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE A ANÁLISE

- a) O nível d'água é coincidente com o nível do terreno durante todo o processo de adensamento.

Esta consideração é respaldada por medições realizadas por medidores de nível d'água instalados fora do aterro e realizadas durante todo o período da análise. Foi observado que o nível d'água é muito próximo do nível do terreno durante todo o processo de adensamento estudado.

- b) O topo e a base da camada de argila são faces drenantes

No topo da camada de argila foi colocado um colchão de areia nas seções B, C, D, E, F e G e uma manta geotextil na seção A, sendo que a base da camada de argila é sobrejacente à uma camada de areia em toda a extensão do aterro.

- c) O excesso de poro-pressão residual, devido à instalação dos drenos, foi considerado nulo no início da análise.

Pela dificuldade de se avaliar quantitativamente e qualitativamente a influência devido à cravação dos drenos no aterro, não foram considerados possíveis recalques ocasionados pela instalação.

IV.4. CÁLCULO DO RECALQUE FINAL

Calculou-se o recalque inicial no centro de cada uma das seções do aterro com base na teoria da elasticidade através da equação (III.2.6) e da figura (III.1).

O módulo de elasticidade não drenado (E_u) foi obtido a partir da equação

$$E_u = 2G (1 + \nu_u) \quad (\text{IV.1})$$

onde ν_u é o coeficiente de Poisson para a condição não drenada e G é o módulo cisalhante. Foi adotado o valor médio de $G = 700$ kpa, baseado na figura IV.14 de ALMEIDA^[2] e $\nu_u = 0,5$ o que forneceu um valor aproximado de $E_u = 2000$ kpa.

Os valores das espessuras da camada de argila para cada seção do aterro e os respectivos pesos específicos do material do aterro foram obtidos da Tabela IV.1. A geometria do aterro, em planta, executada com base em levantamento topográfico realizado pela equipe do IPR, está mostrada na figura IV.15.

Em todas as seções o recalque inicial foi calculado para o eixo do aterro (ponto de abscissa $x = 0$ da figura III.1) na seção transversal mais próxima do centro de cada seção do aterro como está esquematizado na figura IV.15.

Com o fim de avaliar a faixa de variação dos valores de recalques iniciais ao longo da mesma seção, foram calculados valores de s_o para todas as seções transversais G_1 à G_6 da seção G (ver figura IV.15). Os valores de s_o obtidos para este caso variariam de 2,9 cm à 4,7 cm para a 1ª fase de carre

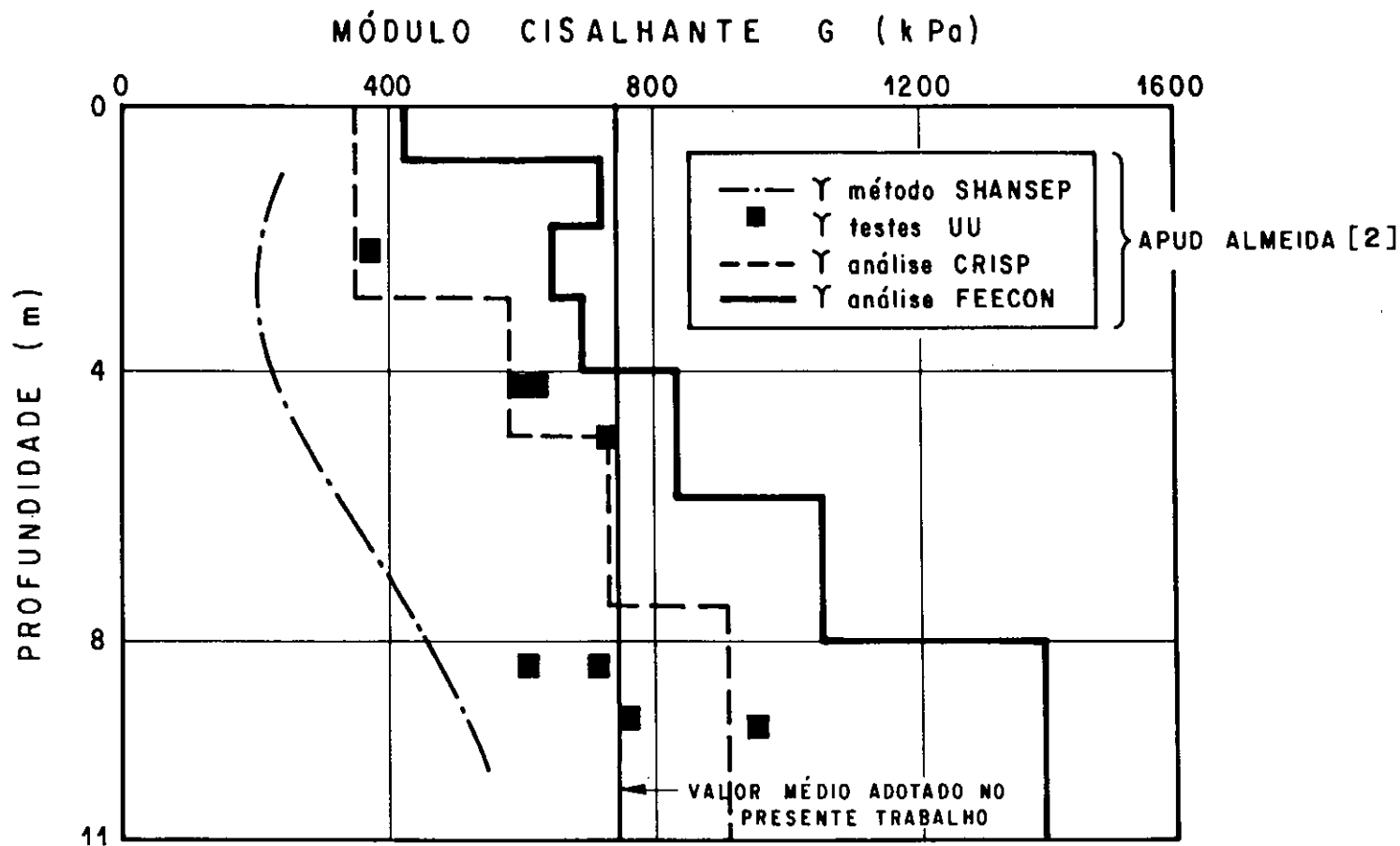


Figura IV.14 - Variação do Módulo Cisalhante G com a profundidade

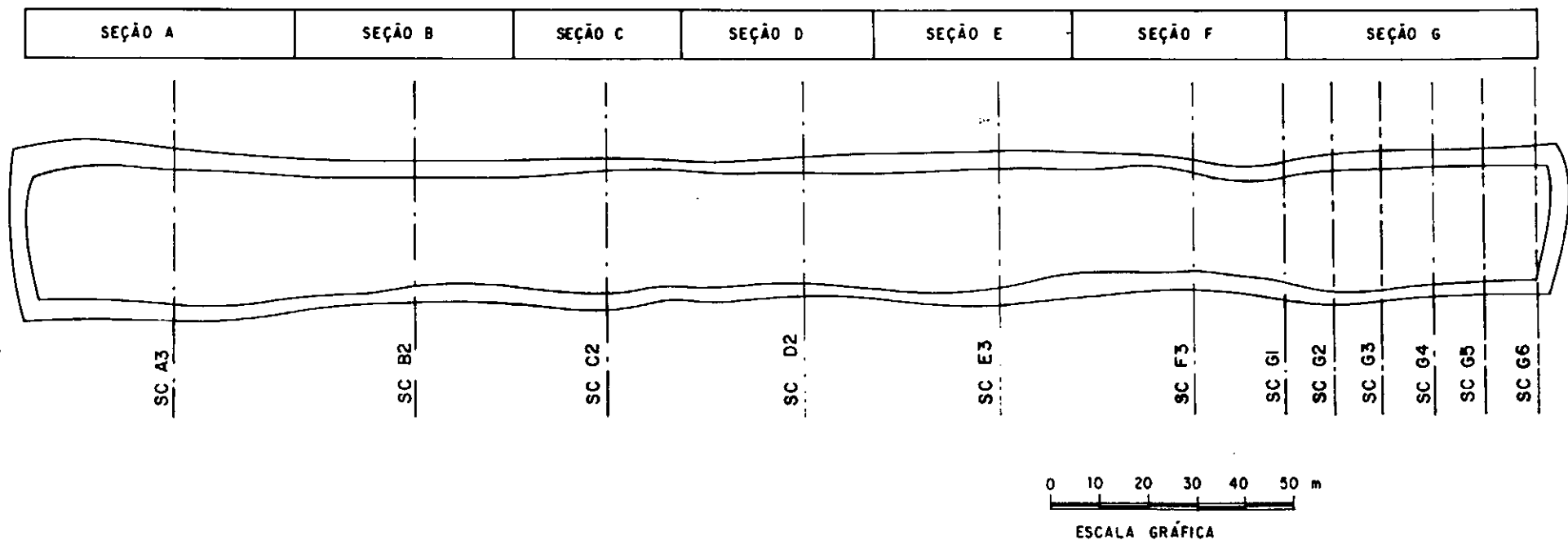


Figura IV.15- Geometria do Aterro Experimental II e respectivas seções utilizadas no cálculo do recalque inicial.

gamento e de 3,6 cm à 4,7 cm para a 2ª fase de carregamento. Sendo as faixas de variação dos valores acima muito pequenas, não foi justificado refinamento adicional nas demais seções.

Os valores dos recalques iniciais para cada seção do Aterro Experimental III, nas 1ª e 2ª fases de construção, estão apresentados na tabela IV.11. Observando-se os valores de recalque iniciais mostrados na tabela acima citada, verificou-se que são muito próximos. Assim, estipulou-se como o valor de s_0 para todo o aterro de 4,0 cm em cada fase de carregamento.

IV.5. CÁLCULO DE COEFICIENTES DE ADENSAMENTO E RECALQUES FINAIS POR ADENSAMENTO PELO MÉTODO DE ELLSTEIN

O cálculo dos coeficiente de adensamento vertical e dos recalques finais por adensamento pelo método de ELLSTEIN^[16] foi realizado com base nas equações (III.5.3) e (III.5.16), respectivamente.

O método foi aplicado às curvas de recalque ao longo do tempo, obtidas pelo "Programa Sarapuí", somente nas seções A e G, sem drenos, visto ser a condição de drenagem vertical inerente ao método, conforme discutido no item III.5. Estas curvas estão mostradas nas figuras IV.1 da 1ª fase de carregamento e nas figuras IV.7 e IV.13 da 2ª fase de carregamento.

Os valores do coeficiente de CARRILLO (c) foram calculados a partir das velocidades de recalques.

Foi calculado o recalque final por adensamento para cada medida de coeficiente de adensamento vertical. Estes va

TABELA IV.11. RECALQUES INICIAIS DAS SEÇÕES DO ATERRO EXPERIMENTAL II PARA AS 1ªs e 2ªs FASES DE CARREGAMENTO, CALCULADOS COM BASE NA EQUAÇÃO (III.2.6) E FIGURA (III.1).

S E Ç Ã O			A	B	C	D	E	F	G
SEÇÃO TRANSVERSAL									
1ª FASE DE CARREGAMENTO	1ª ETAPA DE CARREGAMENTO	h (cm)	105	80	65	65	40	70	90
		b ₁ (cm)	1620	1450	1490	1350	1525	1300	1440
		b ₂ (cm)	1525	1375	1450	1300	1480	1240	1310
		2H/b ₁	0,65	0,72	0,70	0,78	0,67	0,77	0,69
		2H/b ₂	0,69	0,76	0,72	0,81	0,69	0,80	0,76
		r ₁	0,188	0,216	0,208	0,239	0,196	0,235	0,204
		r ₂	0,204	0,231	0,216	0,251	0,204	0,247	0,231
		s ₀₁ (cm)	2,0	1,8	1,2	1,5	0,8	2,0	1,8
	2ª ETAPA DE CARREGAMENTO	h (cm)	75	100	115	145	150	120	100
		b ₁ (cm)	1460	1260	1350	1210	1350	1110	1240
		b ₂ (cm)	1390	1170	1270	1110	1250	1000	1160
		2H/b ₁	0,72	0,83	0,78	0,87	0,75	0,90	0,80
		2H/b ₂	0,75	0,90	0,82	0,94	0,81	1,00	0,86
		r ₁	0,216	0,258	0,239	0,274	0,228	0,285	0,247
		r ₂	0,228	0,285	0,255	0,299	0,251	0,321	0,270
		s ₀₂ (cm)	2,1	2,1	3,4	4,6	3,4	3,2	2,3
		s ₀ = s ₀₁ + s ₀₂ (m)	4,1	3,9	4,6	6,1	4,2	5,2	4,1
		2ª FASE DE CARREGAMENTO	3ª ETAPA DE CARREGAMENTO	h (cm)	-[1]	170	170	170	170
b ₁ (cm)	-			1000	1150	1000	1120	870	1050
b ₂ (cm)	-			825	1025	875	980	730	920
2H/b ₁	-			1,05	0,91	1,05	0,91	1,15	0,95
2H/b ₂	-			1,27	1,02	1,20	1,04	1,36	1,08
r ₁	-			0,338	0,289	0,338	0,289	0,372	0,303
r ₂	-			0,410	0,328	0,388	0,335	0,437	0,348
s ₀ (cm)	-			4,4	4,0	4,5	3,7	4,8	4,4

[1] Na seção A não ocorreu alteamento na 2ª fase de carregamento

lores estão mostrados na Tabela IV.12 e IV.13 para as seções A e G respectivamente.

Para o cálculo dos recalques finais foi somado aos valores dos recalques finais por adensamento o valor do recalque inicial, igual a 4,0 cm.

Os cálculos de coeficiente de adensamento e recalques finais foram realizados pelo Método de ELLSTEIN para as 1ª e 2ª fases de carregamento, isoladamente. O tempo $t_0 = 0$, de início do carregamento, foi considerado, nas seções A e G, para a 1ª fase, nas datas referentes ao início da construção apresentadas na tabela IV.1 e para a 2ª fase, foi considerado como sendo o tempo médio de início da construção 1800 dias após o t_0 da 1ª fase.

Pode-se observar, nas tabelas IV.12 e IV.13, que para tempos pequenos, na 1ª fase de carregamento, obtiveram valores de coeficientes de adensamento e recalques finais negativos. Isto pode ser atribuído aos seguintes fatores:

- (a) pouca acurácia das medições iniciais de recalques;
- (b) os cálculos foram realizados para tempos durante o período de carregamento, com velocidades de recalques crescentes (valores de c negativos); como na seção A o período de carregamento foi de 334 dias e na seção G foi de 542 dias, os valores negativos foram verificados para $t = 200$ dias na seção A para $t = 200$ e 400 dias, na seção G;
- (c) conforme observação de ELLSTEIN as estimativas de recalques não são boas para $U_v < 20\%$. (ver item III.5.4).

**TABELA IV.12. VALORES DE COEFICIENTES DE ADENSAMENTO VERTICAL E RECALQUES FINAIS POR ADENSAMENTO
CALCULADOS PELO MÉTODO DE ELLSTEIN**

SEÇÃO		A								
PONTOS		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1ª Fase de Carregamento	t (dias) ^[1]	200	400 ^[3]	600	800	1000	1200	1400	1600 ^[4]	1800
	s_t (cm)	16,2	33,7	48,3	57,5	64,6	70,4	75,8	79,6	83,7
	ds_t/dt (mm/dia)	0,55	1,10	0,61	0,37	0,31	0,26	0,22	0,19	0,16
	$c_v \times 10^{-4}$ (cm ² /s)	[5]	43,0	34,0	11,0	11,0	9,6	10,0	9,5	-
	$s(\infty)$ (cm)	[5]	59,6	66,9	99,2	97,2	105,6	97,8	105,7	-
	s_f	[5]	63,6	106,9	103,2	101,2	109,6	101,8	109,7	-
2ª Fase de Carregamento	t (dias) ^[1]	- [2]	-	-	-	-	-	-	-	-
	s_t (cm)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	ds_t/dt	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$c_v \times 10^{-4}$ (cm ² /s)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$s(\infty)$ (cm)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	s_f (cm)	-	-	-	-	-	-	-	-	-

NOTAS:

- [1] O tempo t representa o número de dias decorridos do início da construção da respectiva fase de carregamento.
 [2] Na seção A não ocorreu alteamento na 2ª fase de carregamento.
 [3] Valores correspondentes ao período do final da construção até 6 meses após o término da construção da respectiva fase de carregamento.
 [4] Valores correspondentes às últimas medições de dados realizadas
 [5] Valores negativos.

TABELA IV.13. VALORES DE COEFICIENTES DE ADENSAMENTO VERTICAL E RECALQUES FINAIS POR ADENSAMENTO
CALCULADOS PELO MÉTODO DE ELLSTEIN

SEÇÃO		G								
PONTOS		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1ª Fase de Carregamento	t (dias) ^[1]	200	400	600 ^[5]	800	1000	1200	1400	1600 ^[6]	1800
	s_t (cm)	12,9	25,8	40,0	52,5	61,2	68,7	74,6	79,6	85,4
	ds_t/dt (mm/dia)	0,39	0,49	0,81	0,49	0,39	0,35	0,29	0,28	0,27
	$c_v \times 10^{-4}$ (cm ² /s)	[7]	[7]	24,0	11,0	5,1	9,7	1,9	1,6	-
	$s(\infty)$ (cm)	[7]	[7]	67,2	90,9	131,3	100,8	198,1	246,7	-
	s_f (cm)	[7]	[7]	71,2	91,9	135,3	104,8	202,1	250,7	-
2ª Fase de Carregamento	t (dias) ^[1]	50 ^[4]	100 ^[5]	150 ^[5]	200 ^[5]	250	300	350	400	- ^[3]
	s_t (cm)	3,6	12,8	18,4	22,5	26,4	28,8	32,3	34,8	-
	ds_t/dt (mm/dia)	3,64	1,11	0,93	0,72	0,62	0,56	0,54	0,51	-
	$c_v \times 10^{-4}$ (cm ² /s)	260	31,0	49,0	24,0	24,0	5,4	11,0	-	-
	$s(\infty)$ (cm)	11,9	46,5	32,6	50,9	42,8	149,1	71,2	-	-
	s_f (cm)	15,9	50,5	36,6	54,9	46,8	153,1	75,2	-	-

NOTAS

- [1] O tempo t representa o número de dias decorridos do início da construção da respectiva fase de carregamento.
 [2] Na seção A não ocorreu alteamento na 2ª fase de carregamento.
 [3] Na fase em questão o referido ponto não foi analisado.
 [4] Foi admitido como 1800 dias o tempo de início da construção da 2ª fase de carregamento da seção G.
 [5] Valores correspondentes ao período do final da construção até 6 meses após o término da construção da respectiva fase de carregamento.
 [6] Valores correspondentes às últimas medições de dados realizadas.
 [7] Valores negativos

Na 2ª fase de carregamento, os valores de recalques finais para tempos pequenos não é negativo, o que é aparentemente decorrente do curto período de carregamento utilizado nesse caso (6 dias), com velocidades de recalques decrescentes ; porém é inferior aos demais valores calculados visto que $U_v < 20\%$ na seção G.

Os valores de c_v e $s(\infty)$ calculados com valores de t crescente oscilaram, sem obedecer à um comportamento bem caracterizado.

O autor deste método sugere a escolha apenas de um par de pontos da curva de recalque ao longo do tempo, como dado único para a determinação de ambos, recalque final por adensamento e coeficiente de adensamento. Porém, com o objetivo de pesquisar, mais detalhadamente, a aplicação do método, o estudo pelo método de ELLSTEIN foi realizado para vários pares de pontos ao longo da curva de recalque x tempo.

A análise de c_v e das velocidades de recalque ao longo do tempo, assim como uma comparação entre os valores de recalque final obtidos pelo método de ELLSTEIN e os valores obtidos pelos demais métodos de cálculo, para cada seção, será apresentadas adiante.

IV.6. CÁLCULO DOS COEFICIENTES DE ADENSAMENTO E RECALQUES FINAIS PELO MÉTODOS DE LONG E CAREY

Os valores de coeficientes de adensamento combinados $c_{v,h}$ e de recalques finais s_f foram calculados pelo método de

LONG e CAREY com base nas equações (III.6.9) e (III.6.11), respectivamente, para as seções com drenos verticais (B à F) do aterro (o método não é aplicavel para o caso de drenagem vertical).

Os cálculos de $c_{v,h}$ e s_f foram efetuados pelo Método de LONG e CAREY para as 1ª e 2ª fases de carregamento, isoladamente. O tempo $t_o = 0$, de início do carregamento foi considerado, nas seções B, C, D, E e F, para a 1ª fase, nas datas referentes ao início da construção da tabela IV.1 e para a 2ª fase, foi considerado como sendo o tempo médio de início da construção, 1800 dias após o t_o da 1ª fase para as seções B e C e 1850 dias para as seções D, E e F.

As figuras IV.2 à IV.6 e IV.8 à IV.12 mostram os pontos utilizados no referido método indicados nos gráficos de variação de altura do aterro e do recalque com o tempo. Estes pontos estão espaçados de um Δt de 200 dias na 1ª fase de carregamento e de 50 e 20 dias na 2ª fase do carregamento, como mostram as figuras citadas acima. Para estes pontos foram calculadados os valores das velocidades de recalque ds_t/dt e traçados os gráficos, $\log ds_t/dt$ em função do tempo. Através deste gráfico foi calculado o valor de $\lg \alpha$ para cada espaço de tempo arbitrado e estão mostrados nas figuras IV.16 à IV.19 .

Os valores de coeficientes de adensamento e recalques finais calculados estão apresentados nas tabelas IV.14 à IV.18, juntamente com os valores parciais de cálculo.

Tendo em vista que nos drenos de areia jateados, da seção D houve durante a execução, maior consumo de areia do

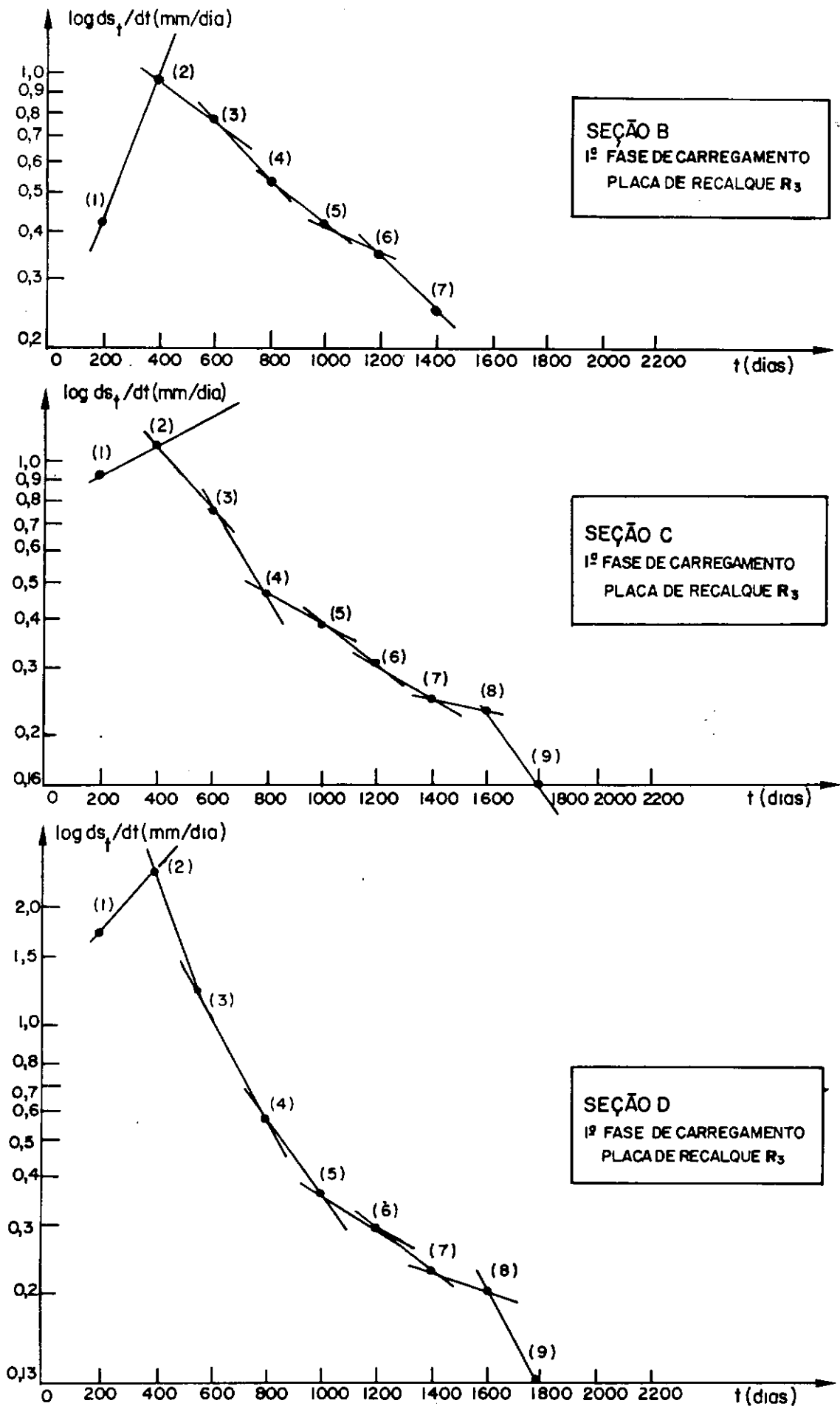


Figura IV.16 - Gráficos $\log ds_f/dt \times t$ necessários ao cálculo pelo método de Long e Carey.

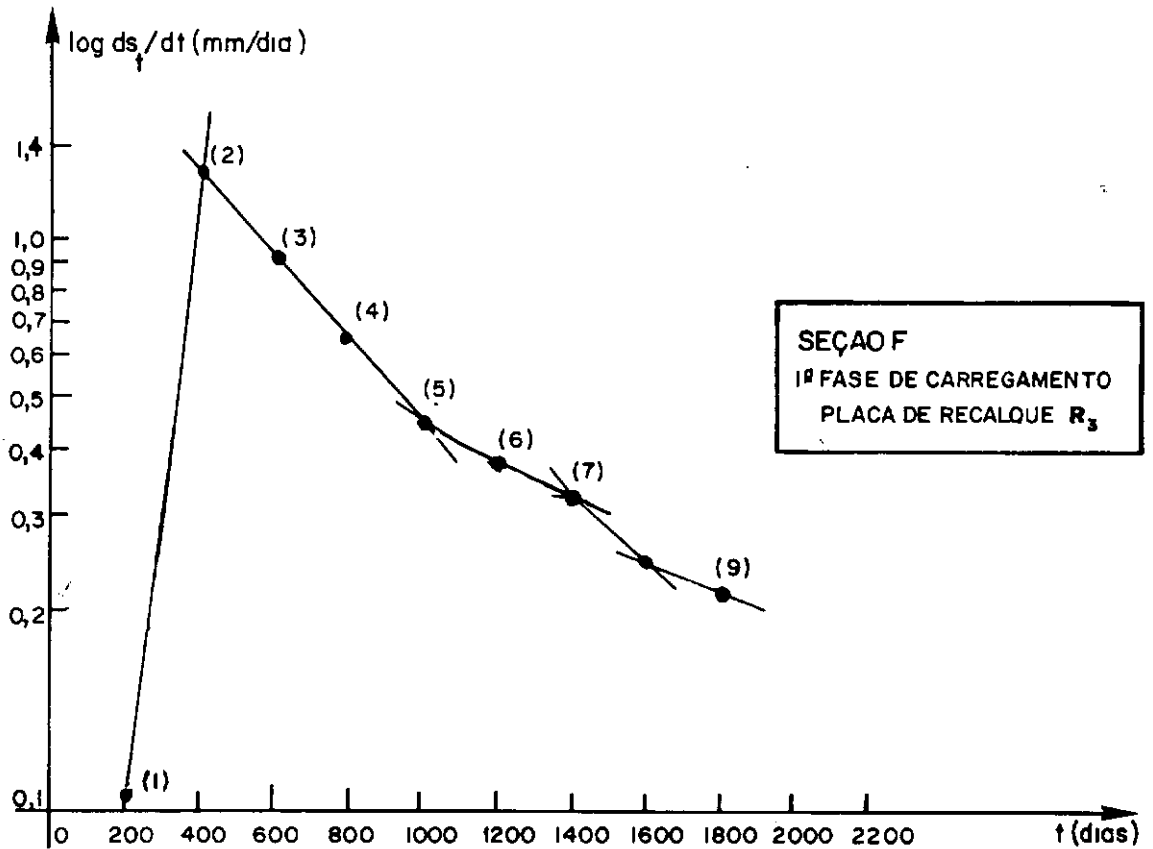
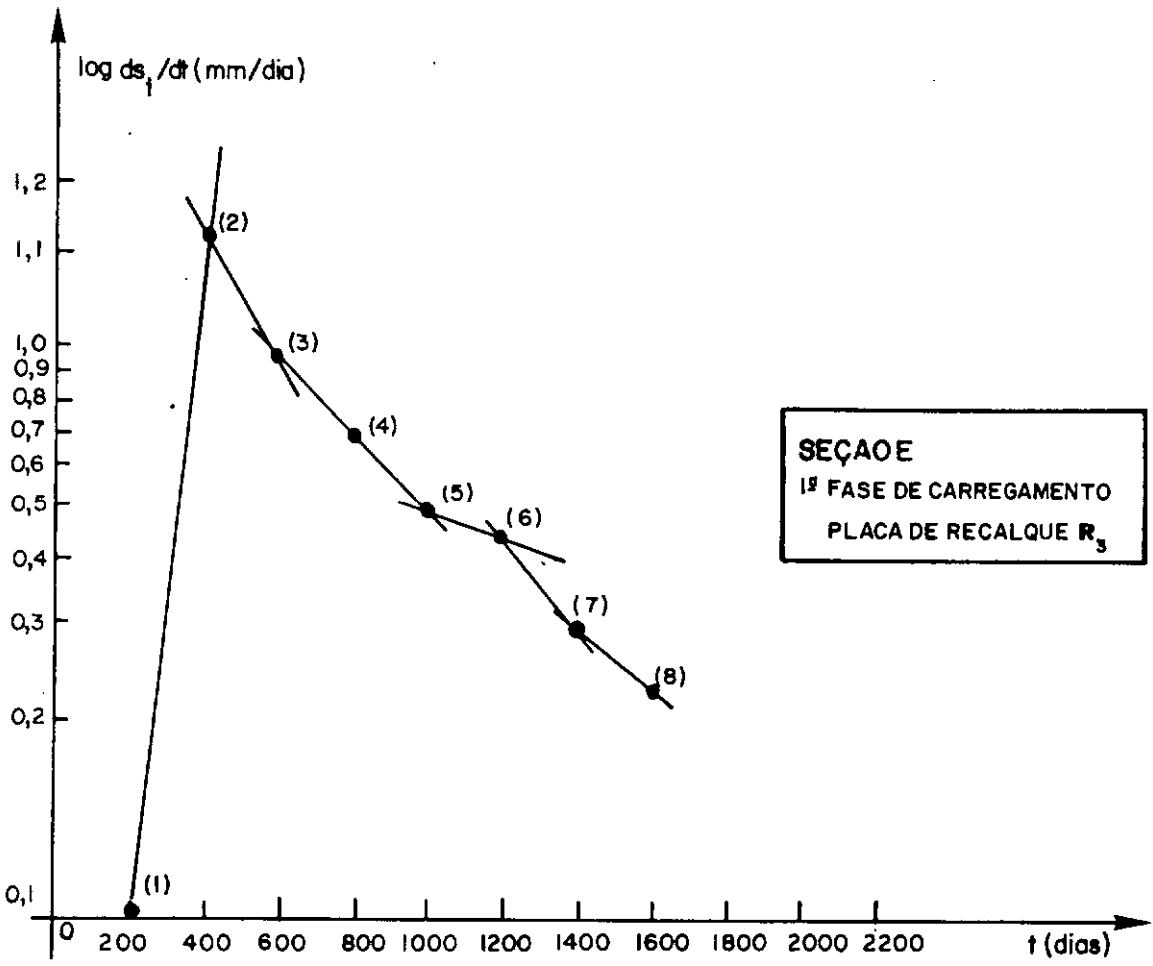


Figura IV.17- Gráficos $\log ds_t/dt \times t$ necessários ao cálculo pelo método de Long e Carey

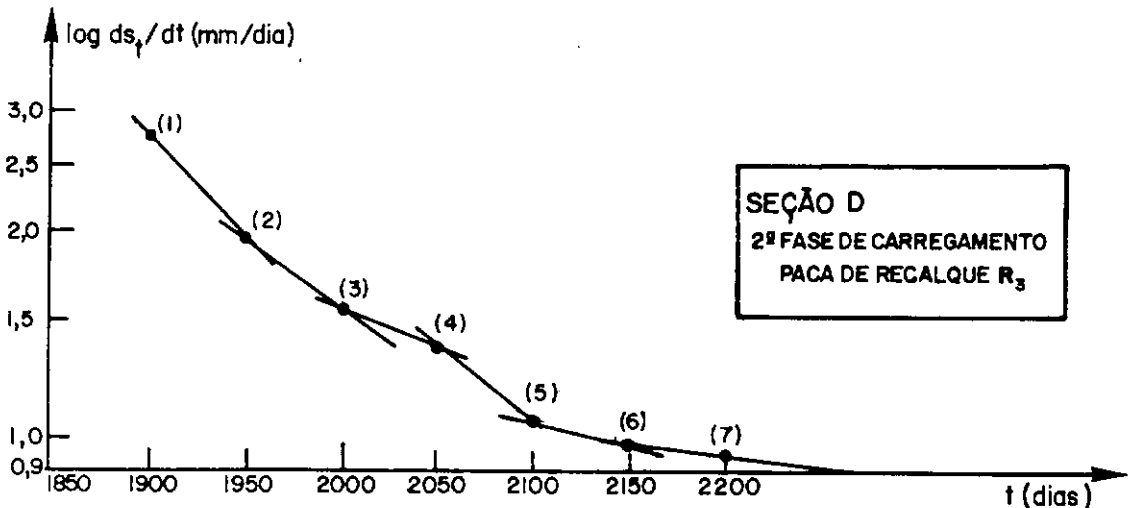
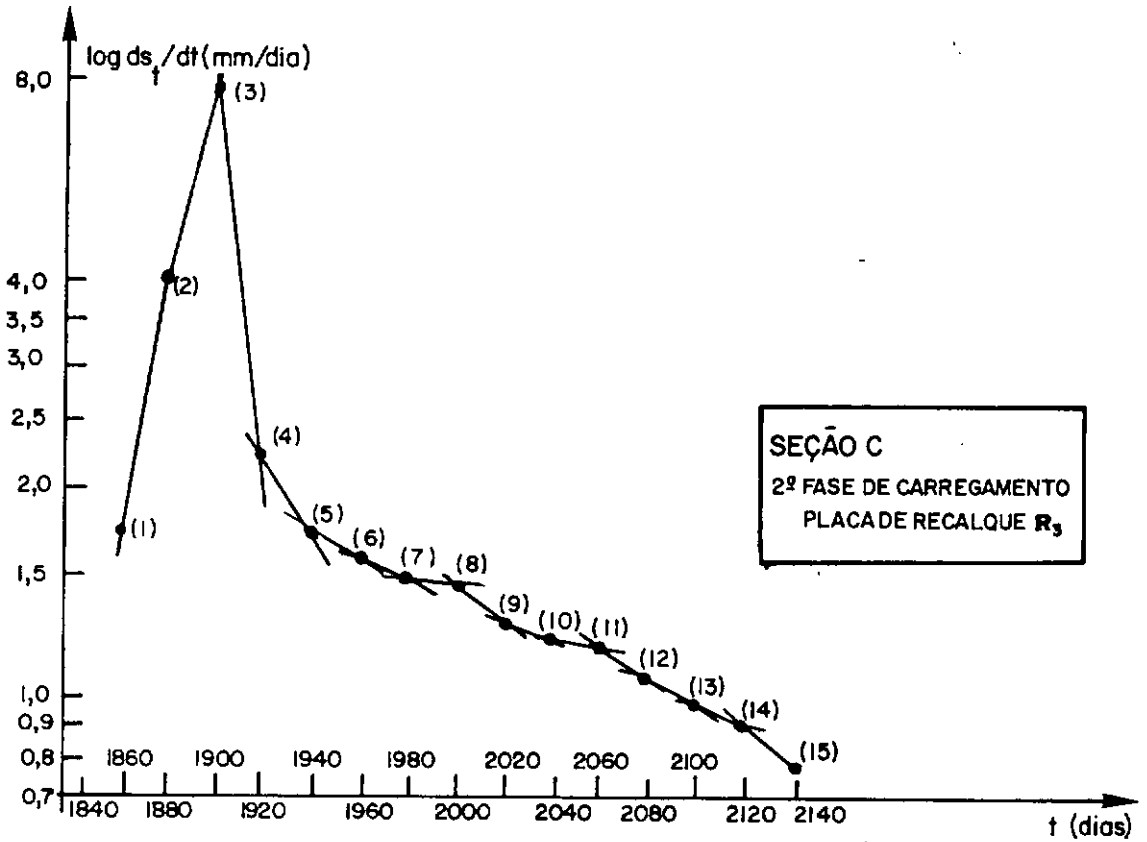
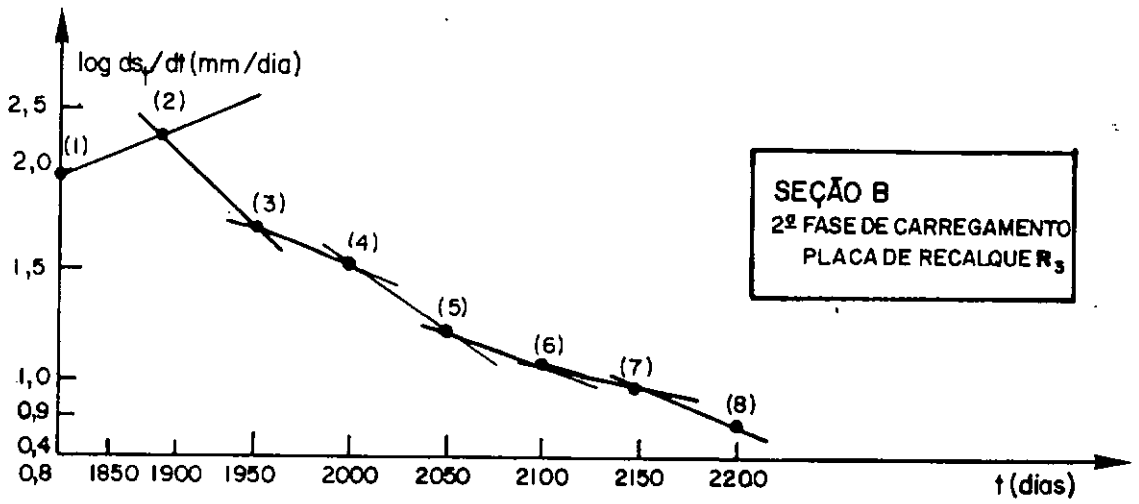


Figura IV.18- Gráficos $\log ds_t/dt \times t$ necessários ao cálculo pelo método de Long e Carey.

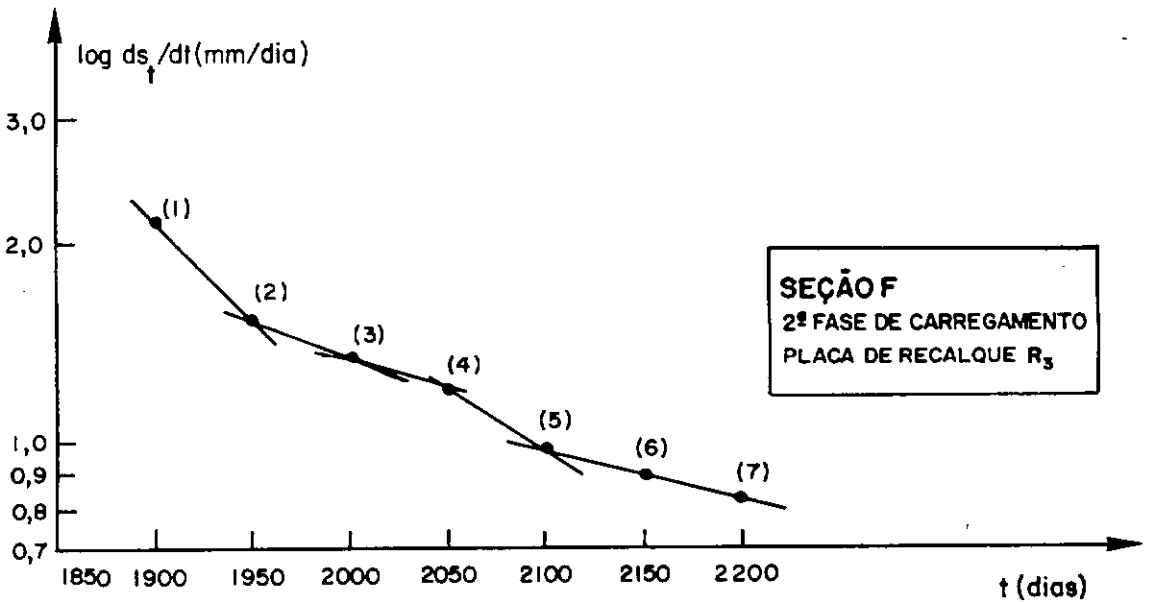
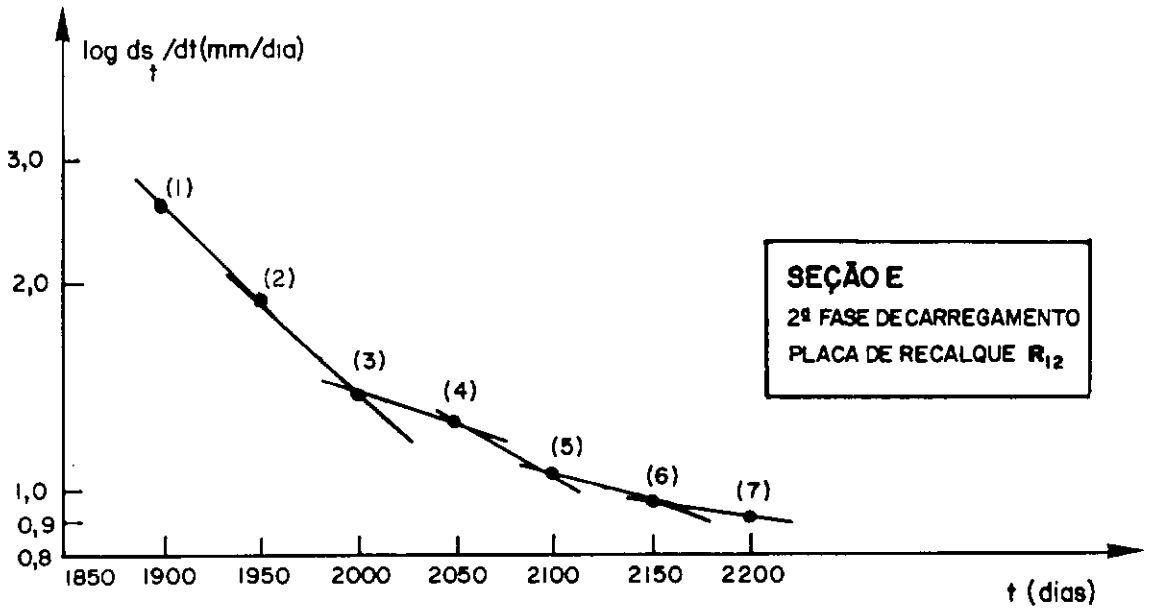


Figura IV.19- Gráficos $\log ds_t/dt \times t$ necessários ao cálculo pelo método de Long e Carey.

TABELA IV.14. VALORES DE COEFICIENTE DE ADENSAMENTO COMBINADO E RECALQUE FINAL CALCULADOS PELO MÉTODO DE LONG & CAREY

SEÇÃO		B							
PONTOS		1	2	3	4	5	6	7	8
2ª Fase de Carregamento	t (dias) ^[1]	200	400 ^[4]	600	800	1000	1200 ^[5]	1400	- ^[2]
	s _t (cm)	18,5	41,5	60,0	73,5	83,0	91,5	97,5	-
	ds _t /dt	0,42	0,96	0,79	0,52	0,42	0,35	0,25	-
	tgα(x10 ⁻⁴)	+17,95	-4,23	-9,08	-4,64	-3,96	-7,31	-	-
	c _{v,h} x10 ⁻⁴ (cm ² /s)	[6]	1,4	3,0	1,5	1,3	2,4	-	-
	s _f (cm)	[6]	146,0	99,5	122,9	134,0	112,5	-	-
1ª Fase de Carregamento	t (dias) ^[1]	50	100 ^[4]	150 ^[4]	200 ^[4]	250	300	350 ^[5]	400
	s _t (cm)	1,7	16,7	26,1	34,5	41,7	47,5	53,4	58,1
	ds _t /dt	2,0	2,3	1,7	1,5	1,2	1,1	1,0	0,9
	tgα(x10 ⁻⁴)	+12,14	-26,3	-10,9	-19,4	-15,8	-8,28	-17,4	-
	c _{v,h} x10 ⁻⁴ (cm ² /s)	[6]	8,7	3,6	6,4	5,2	2,7	5,8	-
	s _f (cm)	[6]	52,7	97,2	70,5	76,6	112,4	79,3	-

[1] O tempo t representa o número de dias decorrido do início da construção da respectiva fase de carregamento.

[2] Na fase de carregamento em questão o referido ponto não foi analisado.

[3] Foi admitido como 1800 dias o tempo de início da construção da 2ª fase de carregamento.

[4] Valores correspondentes ao período do final da construção até 6 meses após o término da construção da respectiva fase de carregamento.

[5] Valores correspondentes às últimas medições de dados realizadas.

[6] Valores negativos.

TABELA IV.15. VALORES DE COEFICIENTE DE ADENSAMENTO COMBINADO E RECALQUE FINAL CALCULADO PELO
MÉTODO DE LONG E CAREY

S E Ç Ã O		C														
P O N T O S		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1ª FASE DE CARREGAMENTO	t (dias) ^[1]	200	400 ^[4]	600	800	1000	1200	1400	1600 ^[5]	1800	[2]	[2]	[2]	[2]	[2]	[2]
	s _t (cm)	14,5	41,0	60,0	72,0	81,0	88,5	94,5	98,5	104,0	-	-	-	-	-	-
	ds _t /dt(cm/dias)	0,92	1,10	0,75	0,47	0,39	0,31	0,26	0,23	0,16	-	-	-	-	-	-
	tgα(x10 ⁻⁴)	+3,88	-8,3	-10,1	-4,05	-5,0	-3,8	-2,7	-7,9	-	-	-	-	-	-	-
	c _{v,h} x10 ⁻⁴ (cm ² /s)	[6]	2,8	3,3	1,3	1,7	1,3	0,9	2,6	-	-	-	-	-	-	-
	s _f (cm)	[6]	100,8	92,3	124,9	117,4	125,9	128,7	116,5	-	-	-	-	-	-	-
2ª FASE DE CARREGAMENTO	t (dias) ^[1]	60	80 ^[4]	100 ^[4]	120 ^[4]	140 ^[4]	160 ^[4]	180 ^[4]	200 ^[4]	220 ^[4]	240	260	280	300	320 ^[5]	340
	s _t (cm)	2,3	10,2	20,0	31,9	35,3	39,1	42,5	45,1	47,8	50,1	53,0	55,1	57,1	59,2	61,4
	ds _t /dt(cm/dias)	1,7	4,0	8,20	2,20	1,71	1,53	1,48	1,41	1,28	1,20	1,13	1,07	0,95	0,88	0,75
	tgα(x10 ⁻⁴)	+185,8	+155,9	-285,7	-54,7	-24,1	-7,2	-16,3	-21,0	-14,0	-13,1	-11,9	-25,8	-16,6	-34,7	-
	c _{v,h} x10 ⁻⁴ (cm ² /s)	[6]	[6]	95,0	18,0	8,0	2,4	5,4	7,0	4,6	4,3	3,9	8,6	5,5	12,0	-
	s _f (cm)	[6]	[6]	36,3	47,2	71,5	143,3	78,4	74,4	84,6	99,6	92,4	72,9	85,6	74,1	-

[1] O tempo t representa o número de dias decorrido do início da construção da respectiva fase de carregamento.

[2] Na fase de carregamento em questão o referido ponto não foi analisado.

[3] Foi admitido como 1800 dias o tempo de início da construção da 2ª fase de carregamento.

[4] Valores correspondentes ao período do final da construção até 6 meses após o término da construção da respectiva fase de carregamento.

[5] Valores correspondentes às últimas medições de dados realizadas.

[6] Valores negativos.

TABELA IV.16. Valores de Coeficiente de Adensamento Combinado e Recalque Final
Calculados pelo Método de LONG e CAREY

SEÇÃO		D								
PONTOS		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1ª Fase de Carregamento	t (dias) [1]	200	400 [4]	600	800	1000	1200	1400	1600 [5]	1800
	s_t (cm)	30,0	76,1	106,7	120,0	130,5	137,2	143,3	147,3	150,0
	ds_t/dt (cm/dias)	1,76	2,45	1,05	0,57	0,36	0,30	0,23	0,20	0,13
	$tg \alpha (x10^{-4})$	+7,2	-18,4	-13,3	-9,98	-3,96	-5,77	-3,04	-9,4	--
	$c_{v,h}^* x10^{-4} (cm^2/s)$ [6]	[7]	6,1	4,4	3,3	1,3	1,9	1,0	3,1	--
	$c_{v,h}^{**} x10^{-4} (cm^2/s)$ [6]	[7]	5,1	3,7	2,8	1,1	1,6	0,8	2,6	--
	$c_{v,h}^{***} x10^{-4} (cm^2/s)$ [6]	[7]	4,3	3,1	2,3	0,9	1,4	0,7	2,2	--
	s_f (cm)	[7]	129,6	135,7	148,5	170,7	163,3	173,1	155,2	--
2ª Fase de Carregamento	t (dias) [1]	50 [3]	100 [4]	150 [5]	200	250	300 [5]	350	-- [2]	-- [2]
	s_t (cm)	16,6	27,8	37,3	44,4	50,1	56,0	61,0	--	--
	ds_t/dt (cm/dias)	2,77	1,96	1,54	1,36	1,05	0,98	0,93	--	--
	$tg \alpha (10^{-4})$	-30,1	-20,5	-10,8	-22,5	-5,99	-4,55	--	--	--
	$c_{v,h}^* x10^{-4} (cm^2/s)$ [6]	10,0	6,8	3,6	7,5	2,0	1,5	--	--	--
	$c_{v,h}^{**} x10^{-4} (cm^2/s)$ [6]	8,3	5,7	3,0	6,2	1,7	1,3	--	--	--
	$c_{v,h}^{***} x10^{-4} (cm^2/s)$ [6]	7,1	4,8	2,5	5,3	1,4	1,1	--	--	--
	s_f (cm)	54,8	73,0	98,0	69,4	138,6	153,9	--	--	--

[1] O tempo t representa o número de dias decorrido do início da construção da respectiva fase de carregamento.

[2] Na fase de carregamento em questão o referido ponto não foi analisado.

[3] Foi admitido como 1850 dias o tempo de início da construção da 2ª fase de carregamento.

[4] Valores correspondentes ao período do final da construção até 6 meses após o término da construção da respectiva fase de carregamento.

[5] Valores correspondentes às últimas medições de dados realizadas

[6] Os símbolos (*), (**) e (***) correspondem ao cálculo realizado com valores de r_w de 20, 25 e 30 cm, respectivamente.

[7] Valores negativos.

TABELA IV.17. VALORES DE COEFICIENTE DE ADENSAMENTO COMBINADO E RECALQUE FINAL CALCULADO
PELO MÉTODO DE LONG E CAREY

S E Ç Ã O		E							
P O N T O S		1	2	3	4	5	6	7	8
1ª FASE DE CARREGAMENTO	t (dias) [1]	200	400[4]	600	800	1000	1200	1400[5]	1600
	s _t (cm)	5,0	30,0	53,5	68,0	79,0	88,0	96,5	102,5
	ds _t /dt (cm/dias)	0,10	1,66	0,94	0,66	0,48	0,44	0,29	0,21
	tg α (x10 ⁻⁴)	+61,0	-12,3	-7,68	-6,92	-1,89	-9,05	-7,01	-
	c _{v,h} [*] x10 ⁻⁴ (cm ² /s) [6]	[7]	4,4	2,7	2,5	0,7	3,2	2,5	-
	c _{v,h} ^{**} x10 ⁻⁴ (cm ² /s) [6]	[7]	5,0	3,1	2,8	0,77	3,7	2,9	-
	s _f (cm)	3	84	102	108	186	112	118	-
2ª FASE DE CARREGAMENTO	t (dias) [1]	50[3]	100[4]	150[4]	200	250	300[5]	350	- [2]
	s _t (cm)	11,7	21,7	30,0	36,7	42,9	48,3	52,9	-
	ds _t /dt (cm/dias)	2,57	1,84	1,38	1,24	1,01	0,95	0,90	-
	tg α (x10 ⁻⁴)	-29,0	-34,3	-9,29	-17,8	-5,32	-4,70	-	-
	c _{v,h} [*] x10 ⁻⁴ (cm ² /s) [6]	10,0	12,0	3,3	6,3	1,9	1,7	-	-
	c _{v,h} ^{**} x10 ⁻⁴ (cm ² /s) [6]	12,0	14,0	3,8	7,2	2,2	1,9	-	-
	s _f (cm)	46,9	47,1	96,0	70,1	133,7	135,6	-	-

NOTAS

- [1] O tempo t representa o número de dias decorrido do início da construção da respectiva fase de carregamento.
 [2] Na fase de carregamento em questão o referido ponto não foi analisado.
 [3] Foi admitido como 1850 dias o tempo de início da construção da 2ª fase de carregamento.
 [4] Valores correspondentes ao período do final da construção até 6 meses após o término da construção da respectiva fase de carregamento.
 [5] Valores correspondentes às últimas medições de dados realizadas.
 [6] Os símbolos *. ** correspondem ao cálculo realizado com valores dos coeficientes de forma iguais à 0,75 e 0,50 respectivamente.
 [7] Valores negativos.

TABELA IV.18. VALORES DE COEFICIENTE DE ADENSAMENTO COMBINADO E RECALQUE FINAL CALCULADOS PELO MÉTODO DE LONG E CAREY

S E Ç Ã O		F								
P O N T O S		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1ª FASE DE CARREGAMENTO	t (dias) ^[1]	200	400 ^[4]	600	800	1000	1200	1400	1600 ^[5]	1800
	s_t (cm)	8,7	30,0	56,0	72,0	82,7	91,4	98,1	104,7	110,7
	ds_t/dt (cm/dias)	0,11	1,38	0,91	0,64	0,45	0,39	0,32	0,24	0,21
	$tg\alpha(x10^{-4})$	+ 54,9	-9,04	-7,64	-7,64	-3,11	-4,30	-6,30	-2,90	-
	$c_{v,h}^* x10^{-4} (cm^2/s)$	[7]	3,6	3,1	3,1	1,3	1,7	2,5	1,2	-
	$c_{v,h}^{**} x10^{-4} (cm^2/s)$	[7]	4,2	3,6	3,6	1,5	2,0	2,9	1,4	-
	s_f (cm)	[7]	106,3	109,9	108,1	147,9	128,7	124,3	152,7	-
2ª FASE DE CARREGAMENTO	t (dias) ^[1]	50 ^[3]	100 ^[4]	150 ^[4]	200	250	300 ^[5]	350	- ^[2]	- ^[2]
	s_t (cm)	13,8	22,5	30,0	36,3	41,8	46,8	51,3	-	-
	ds_t/dt (cm/dias)	2,12	1,55	1,36	1,21	0,98	0,91	0,84	-	-
	$tg\alpha(x10^{-4})$	-27,2	-11,36	-10,20	-18,31	-6,44	-6,95	-	-	-
	$c_{v,h}^* x10^{-4} (cm^2/s)$	11,0	4,6	4,1	7,4	2,6	2,8	-	-	-
	$c_{v,h}^{**} x10^{-4} (cm^2/s)$	0,13	5,3	4,8	8,6	3,0	3,2	-	-	-
	s_f (cm)	46,1	83,6	86,8	65,2	111,7	105,3	-	-	-

NOTAS

[1] O tempo t representa o número de dias decorrido do início da construção da respectiva fase de carregamento.

[2] Na fase de carregamento em questão o referido ponto não foi analisado.

[3] Foi admitido como 1850 dias o tempo de início da construção da 2ª fase de carregamento.

[4] Valores correspondentes ao período do final da construção até 6 meses após o término da construção da respectiva fase de carregamento.

[5] Valores correspondentes às últimas medições dos dados realizados.

[6] Os símbolos * e ** correspondem ao cálculo realizado com valores dos coeficientes de forma iguais à 0,75 e 0,50, respectivamente.

[7] Valores negativos.

que o previsto levantou-se a hipótese de que o diâmetro final destes drenos fosse sensivelmente maior que o diâmetro nominal admitido de 40cm. Assim sendo, foram realizados cálculos dos coeficientes de adensamento para diâmetros dos de 50 e 60 cm. Os valores de $c_{v,h}$ calculados para estes dois casos também estão apresentados na tabela IV.16 .

No caso dos drenos artificiais, seções E e F, avaliou-se a influência da variação do fator de forma α , adotando-se também um valor igual à 0,5. Os valores de $c_{v,h}$ calculados para esta hipótese estão apresentados nas tabelas IV.17 e IV.18, respectivamente.

Pode-se observar nos valores apresentados nas tabelas IV.14 à IV.18 que:

- (a) Na 1ª fase de carregamento, para tempos anteriores ao final do carregamento (cerca de 400 dias) os valores de $c_{v,h}$ e s_f foram negativos pois as tangentes à curva de recalques apresentam sinal positivo. Assim, em outras palavras, as velocidades de recalque neste trecho são crescentes, conforme será discutido adiante.

Na 2ª fase de carregamento o mesmo pode ser observado para as seções B e C que tiveram as velocidades de recalque crescentes neste período. Além do que, nas outras seções, para tempos pequenos, os valores de s_f foram menores que os demais.

Observa-se que LONG e CAREY sugeriram não aplicar o método durante os períodos de carregamento e logo após o

carregamento (ver item III.6.4(a) e b).

- (b) Os valores de $c_{v,h}$ e s_f calculados com valores de t crescentes oscilaram, sem obedecer a um comportamento bem caracterizado;
- (c) Na seção D, a medida que se aumenta o diâmetro do dreno o valor $c_{v,h}$ diminui, nas duas fases de carregamento. Nas seções E e F, a medida que se diminui o diâmetro do dreno o valor de $c_{v,h}$ aumenta, nas duas fases de carregamento. Este comportamento pode ser verificado como sendo o esperado através de uma análise da equação (III.6.9).

O estudo através do método de LONG e CAREY não foi realizado para somente um par de pontos escolhido arbitrariamente ao longo da curva de recalque x tempo e sim para vários pontos da curva, com o objetivo de se pesquisar a aplicabilidade do método ao longo do tempo.

A análise da variação de $c_{v,h}$ e das velocidades de recalque com o tempo assim como uma avaliação dos valores de recalque final obtidos pelo método de LONG e CAREY para cada seção, será realizada em conjunto com os demais métodos mais a diante.

IV.7. CÁLCULO DOS RECALQUES FINAIS PELO MÉTODO DE TAN

O cálculo dos recalques finais pelo método de TAN^[42] foi efetuado com base na equação (III.7.1), que caracteri

za o processo de adensamento primário e secundário ocorrendo si multaneamente, para todas as seções do aterro, visto que o método pode ser utilizado para qualquer tipo da drenagem.

O método foi aplicado às curvas de recalque ao longo do tempo mostradas nas figuras IV.1 à IV.13 para as 1ª e 2ª fases do carregamento. Os valores de t/s_t foram calculados para os mesmos pontos utilizados nos métodos de ELLSTEIN e LONG e CAREY.

O método de TAN, como proposto, prevê a utilização de todos os pontos do gráfico $t/s_t \times t$ em uma determinado período de tempo para a definição da reta de inclinação β . Entretanto, com o objetivo de pesquisar a variação de s_f com o tempo optou-se por traçar retas para vários pontos consecutivos.

Assim, para cada intervalo de tempo considerado foram traçadas retas de inclinação β como mostra a figura (III. 4.(c)). Os valores plotados no gráfico $t/s_t \times t$ são apresentadas nas figuras IV.20 a IV. 24 para todas as seções. Os valores de β utilizados no cálculo dos recalques finais através da equação (III.7.3), bem como os valores dos recalques finais estão apresentados nas Tabelas IV.19 à IV.25 .

Os cálculos de s_f efetuados pelo método de TAN para as 1ª e 2ª fases isoladamente obedeceram ao mesmo critério para a escolha de t_o (tempo de início da construção de cada fase de carregamento) já descritos no item IV.5 para as seções A e G e IV.6 para as demais seções.

TAN^[43] observou, conforme citado no item III.7.4, sub item a), que para alguns pontos próximos à origem o método

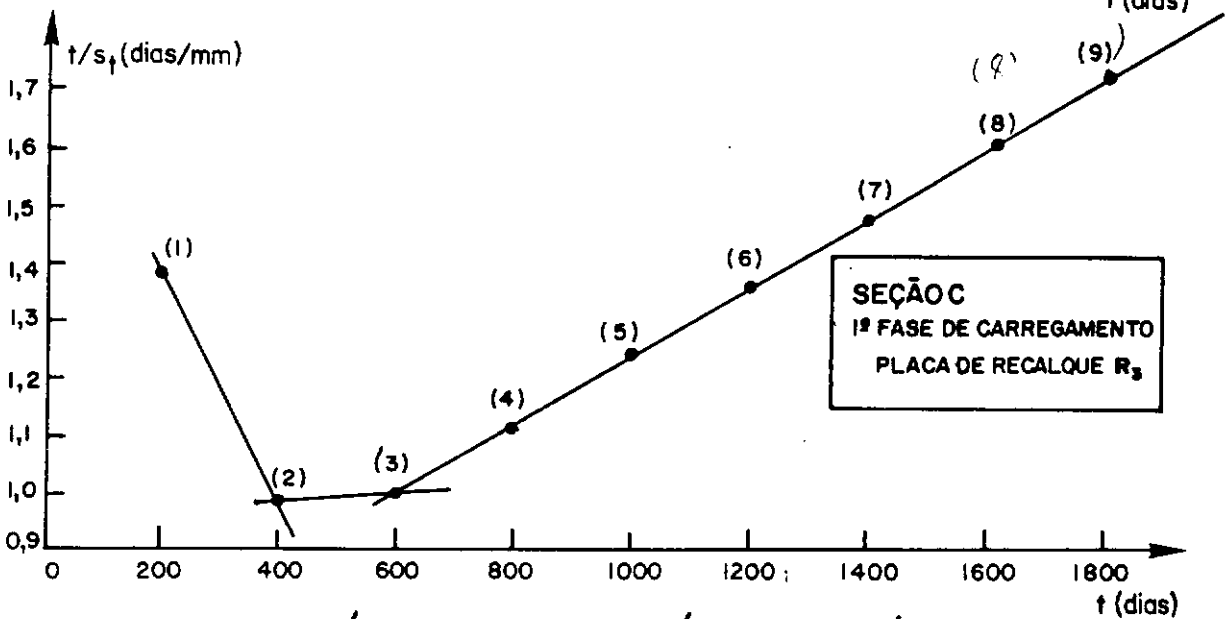
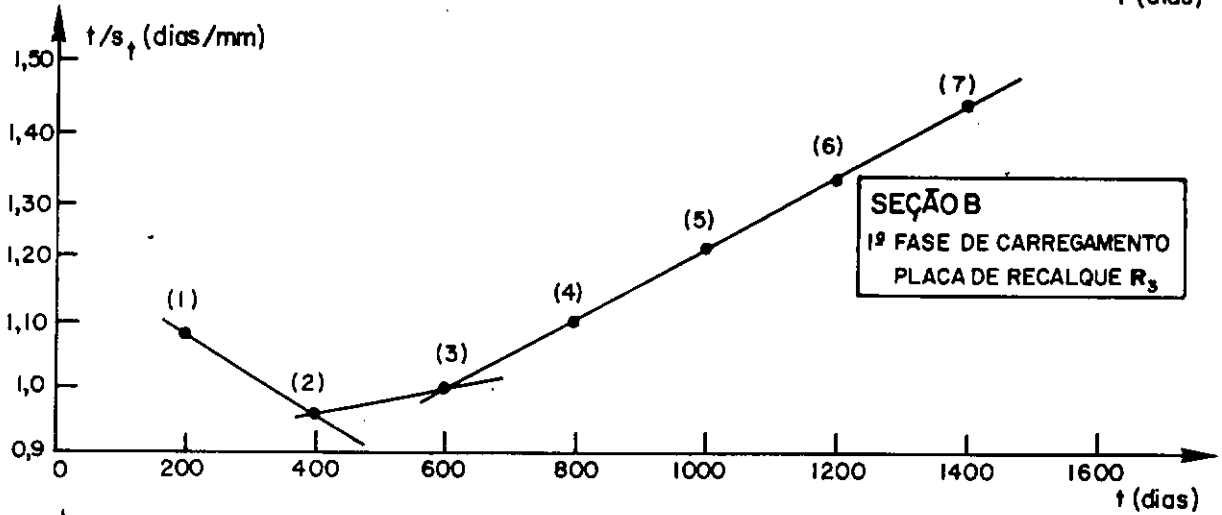
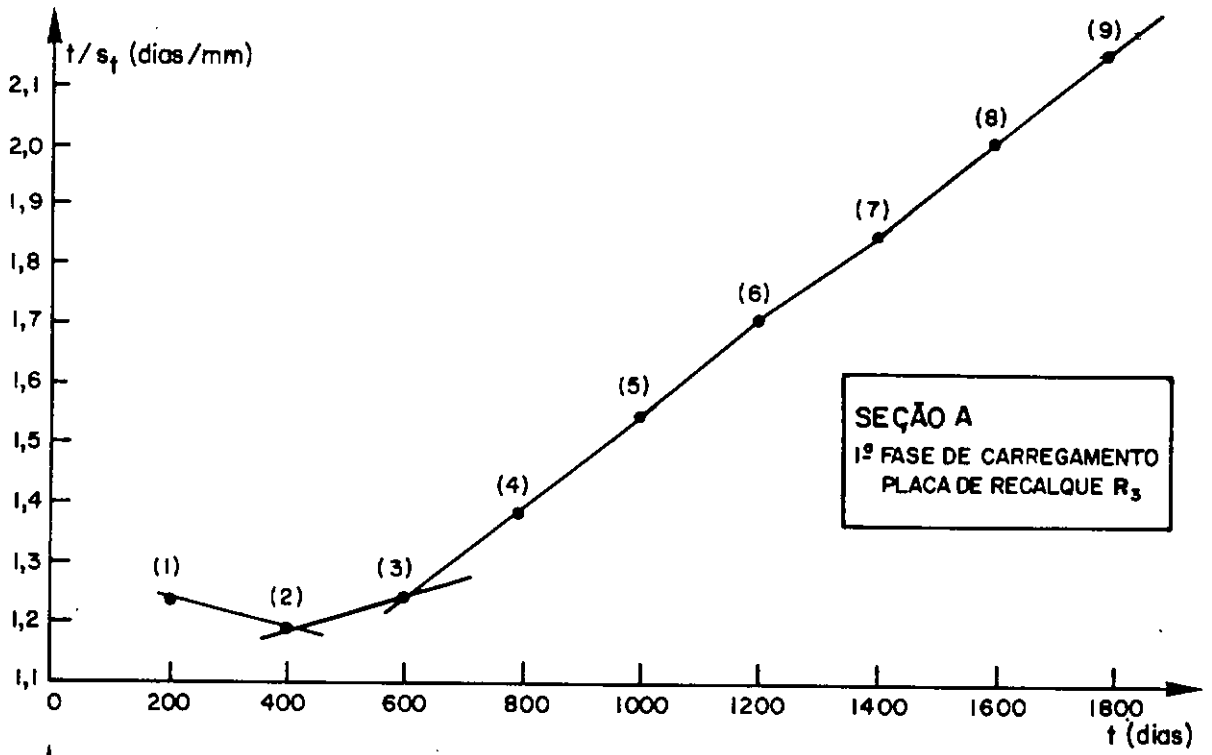


Figura IV.20- Gráficos t/s_t x t para o cálculo pelo método de Tan.

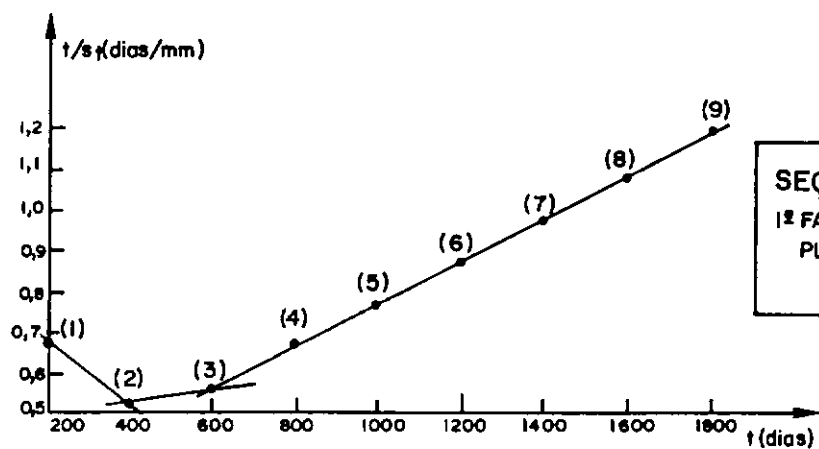
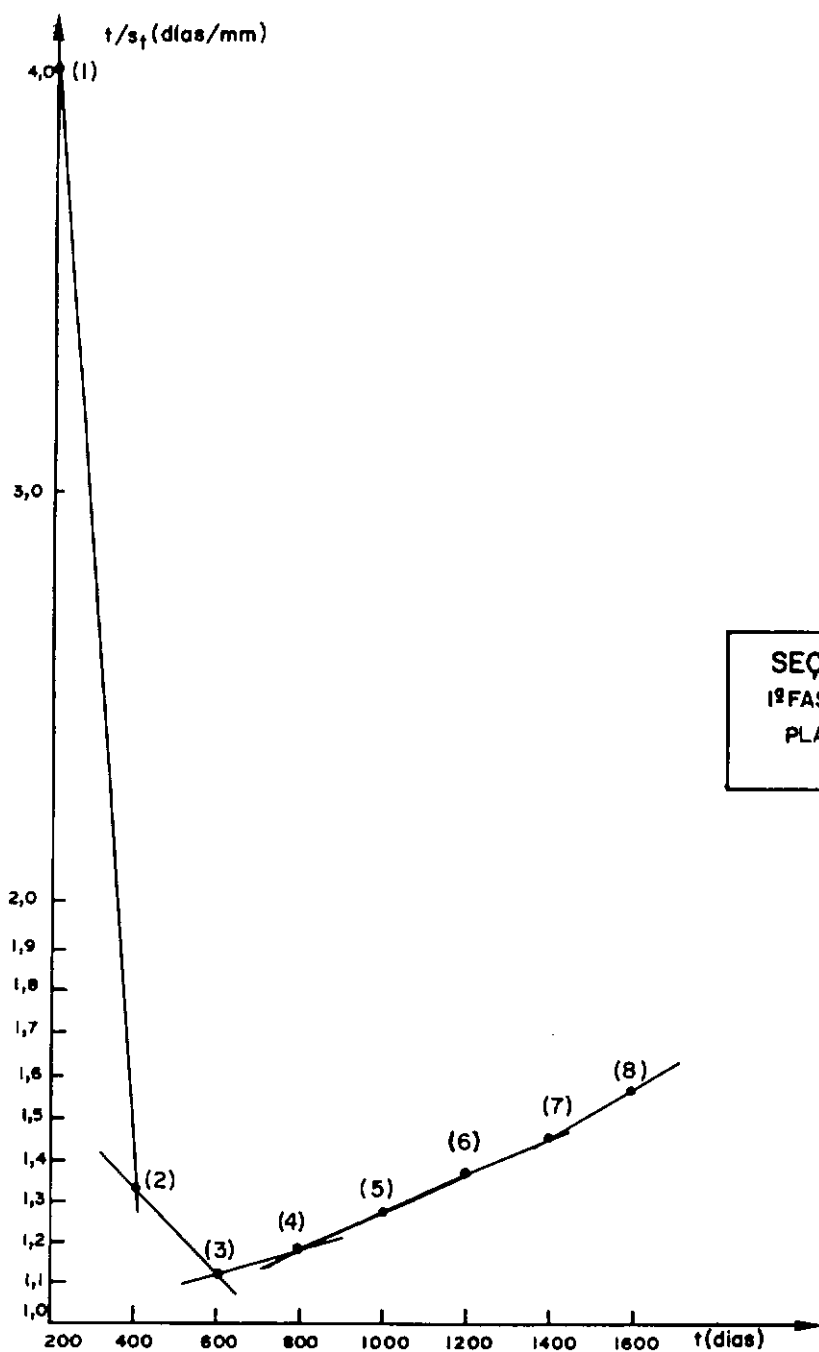


Figura IV.21 Gráficos $t/s_f \times t$ para o cálculo pelo método de Tan.

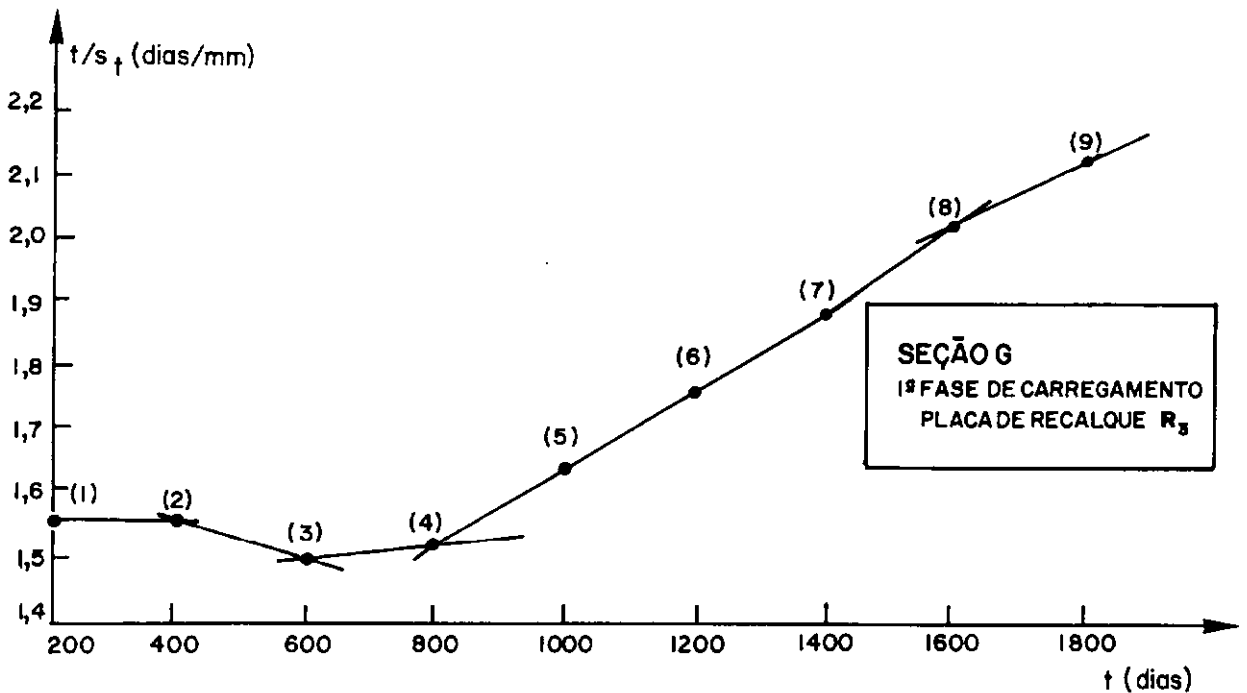
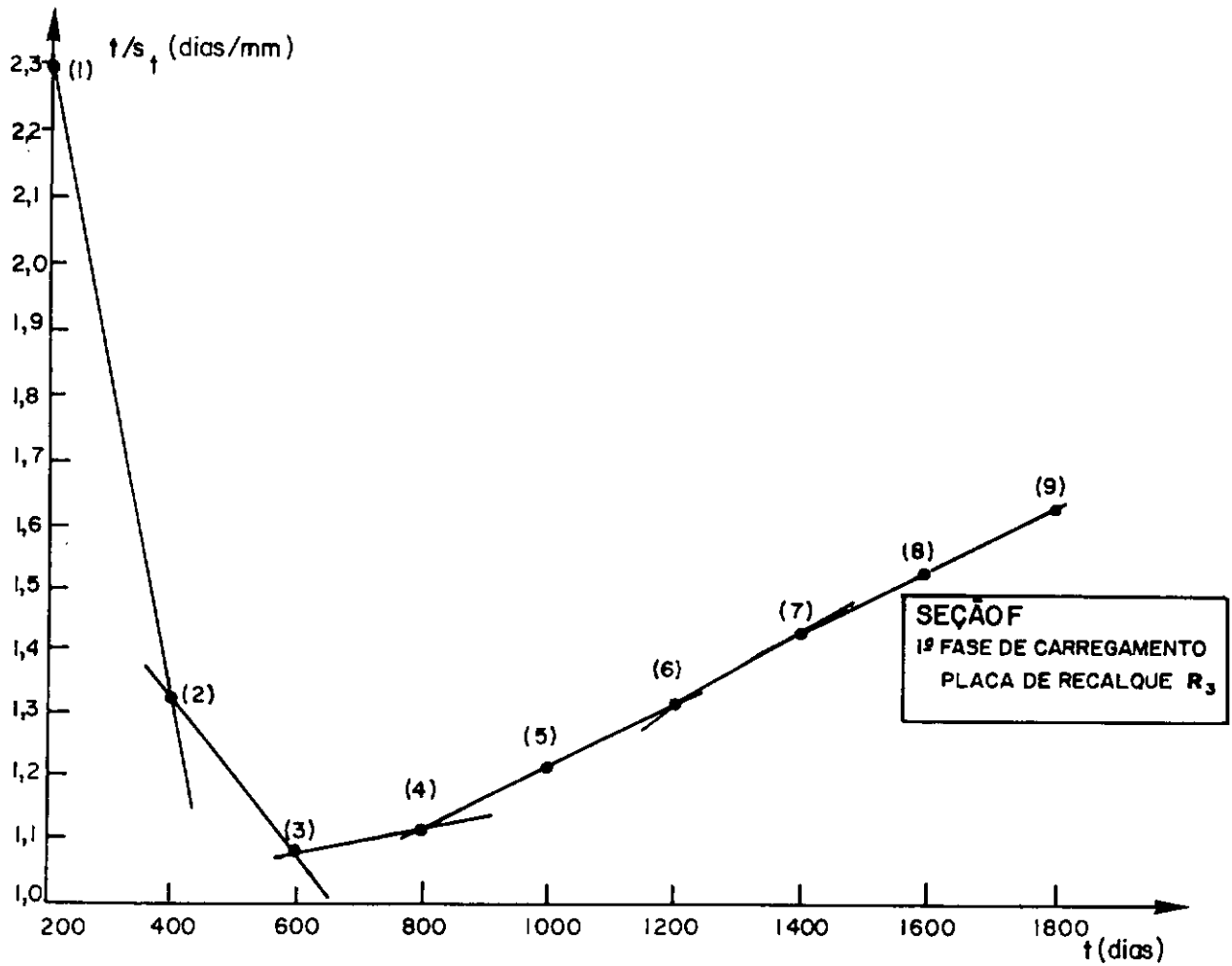


Figura IV.22 - Gráficos $t/s_t \times t$ para o cálculo pelo método de Tan.

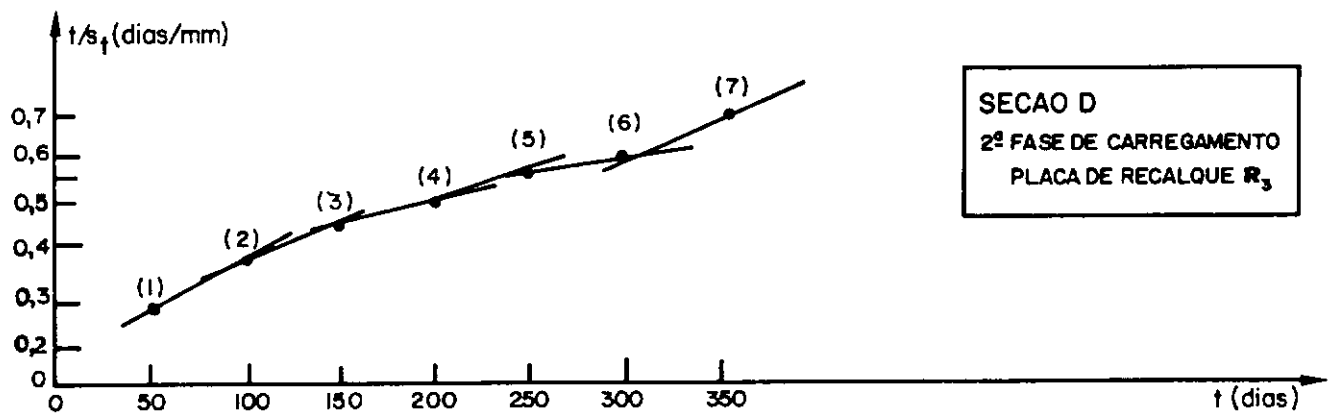
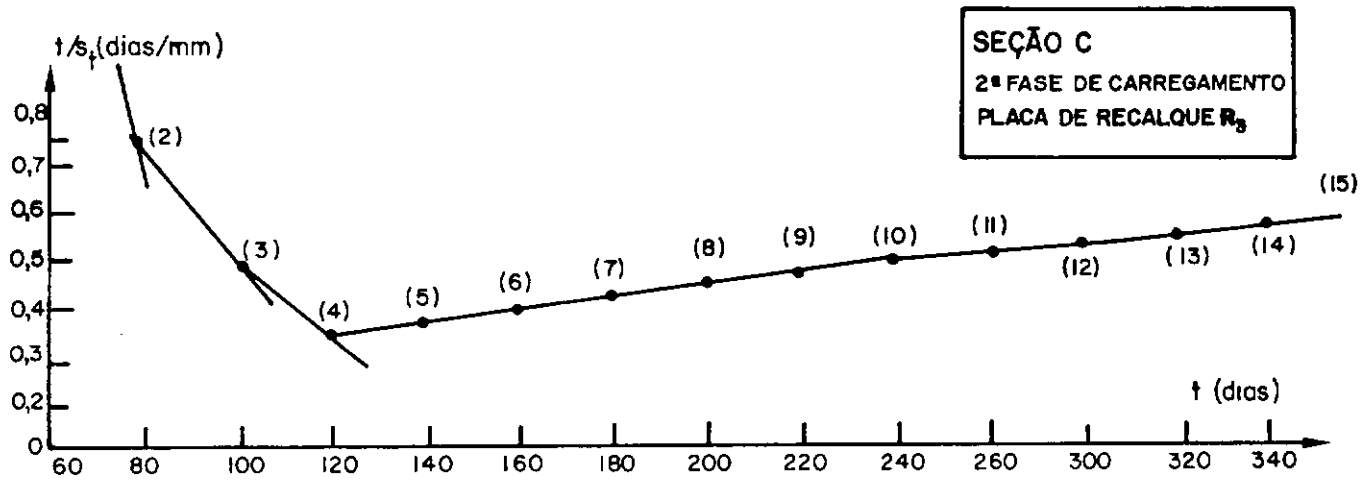
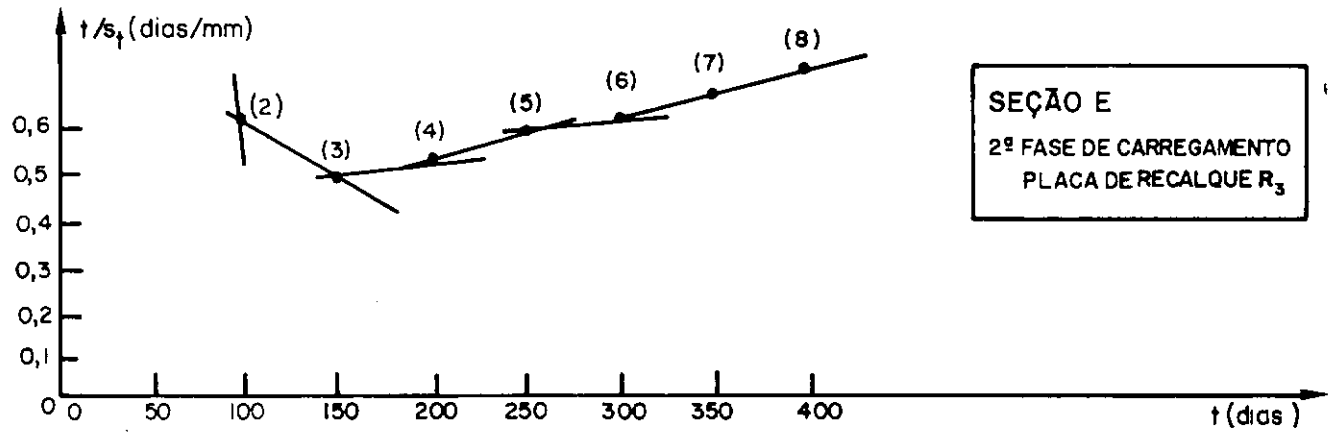


Figura IV 23-Gráficos t/s_t vs t para o cálculo pelo método de Tan.

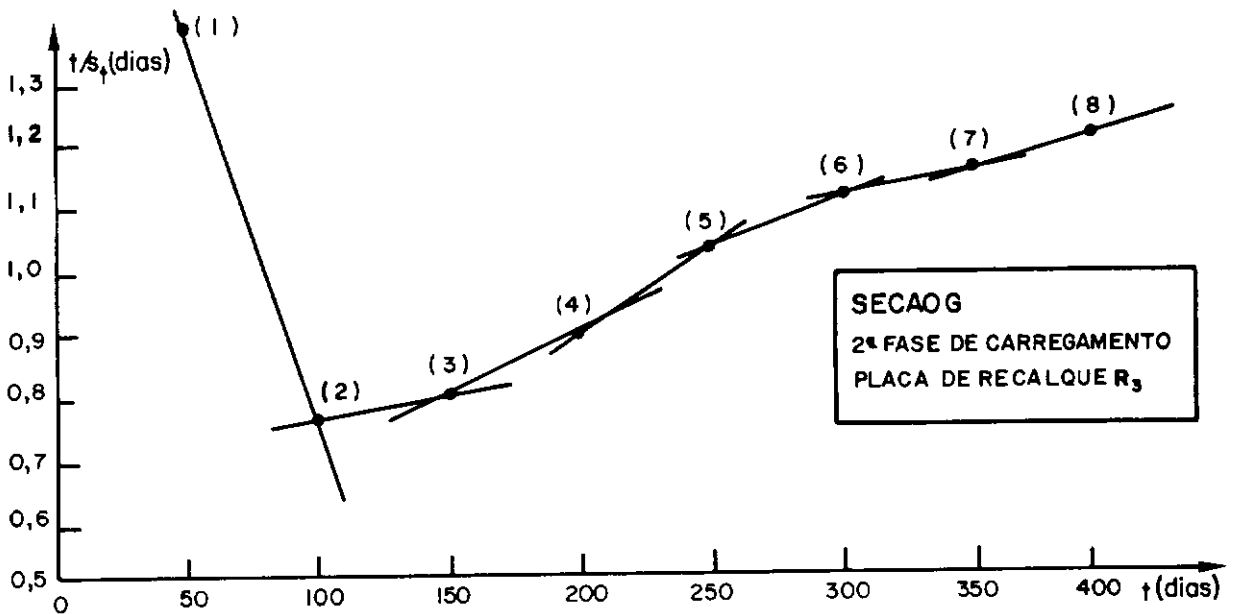
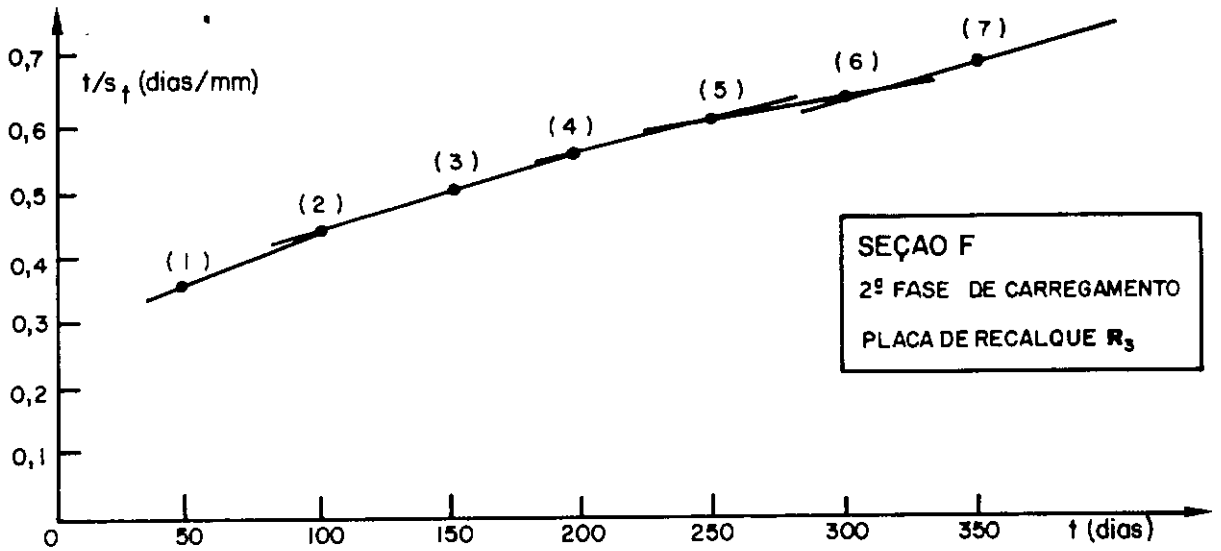
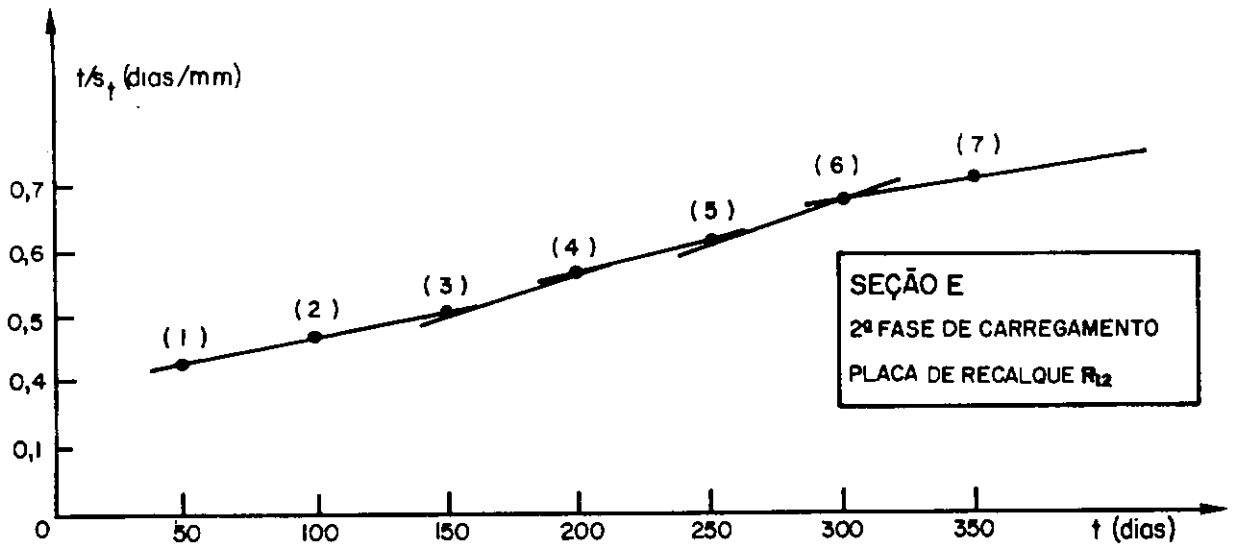


Figura IV.24-Gráficos t/s_f x t para o cálculo pelo método de Tan.

TABELA IV.19. VALORES DE RECALQUES FINAIS CALCULADOS PELO MÉTODO DE TAN

S E Ç Ã O		A								
P O N T O S		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1ª FASE DE CARREGAMENTO	t (dias) ^[1]	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800
	s_t (mm)	162	337	483	575	646	704	758	796	837
	t/s_t (dias/mm)	1,24	1,19	1,24	1,39	1,55	1,71	1,85	2,01	2,15
	$tg\beta(x10^{-4})$	-2,5	+2,5	+7,5	+8,0	+8,0	+7,0	+8,0	+7,0	-
	s_f (cm)	[3]	400,0	133,3	125,0	125,0	142,9	125,0	142,9	-
2ª FASE DE CARREGAMENTO	t (dias) [2]	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	s_t (mm)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	t/s_t (dias/mm)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$tg\beta$	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	s_f (cm)	-	-	-	-	-	-	-	-	-

NOTAS

[1] O tempo t representa o número de dias decorrido do início da construção da respectiva fase de carregamento.

[2] Na seção A não ocorreu alteamento na 2ª fase de carregamento.

[3] Valores negativos.

TABELA IV.20. VALORES DE RECALQUES FINAIS CALCULADOS PELO MÉTODO DE TAN

S E Ç Ã O		B							
P O N T O S		1	2	3	4	5	6	7	8
1ª FASE DE CARREGAMENTO	t (dias)	200	400[4]	600	800	1000	1200[5]	1400	[2]
	s _t (mm)	185	415	600	735	830	915	975	-
	t/s _t (dias/mm)	1,08	0,96	1,00	1,09	1,21	1,31	1,44	-
	tg β (x10 ⁻⁴)	-6,0	+2,0	+4,5	+6,0	+5,0	+6,5	-	-
	s _f (cm)	[6]	500,0	222,2	166,7	200,0	153,9	-	-
2ª FASE DE CARREGAMENTO	t (dias)[1]	50[3]	100[4]	150[4]	200[4]	250	300	350[5]	400
	s _t (mm)	17	167	261	345	417	475	534	581
	t/s _t (dias/mm)	2,94	0,60	0,58	0,59	0,60	0,63	0,66	0,69
	tg β (x10 ⁻⁴)	-468,0	-4,0	+2,0	+2,0	+6,0	+6,0	+6,0	-
	s _f (cm)	[6]	[6]	500,0	500,0	166,7	166,7	166,7	-

NOTAS

- [1] O tempo t representa o número de dias decorrido do início da construção da respectiva fase de carregamento.
- [2] Na fase de carregamento em questão o referido ponto não foi analisado.
- [3] Foi admitido como 1800 dias o tempo de início da construção da 2ª fase de carregamento.
- [4] Valores correspondentes ao período do final da construção até 6 meses após o término da construção da respectiva fase de carregamento.
- [5] Valores correspondentes às últimas medições de dados realizados.
- [6] Valores negativos.

TABELA IV.21. VALORES DE RECALQUES FINAIS CALCULADOS PELO MÉTODO DE TAN

S E Ç Ã O		C														
P O N T O S		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1ª FASE DE CARREGAMENTO	t (dias)[1]	200	400[4]	600	800	1000	1200	1400	1600[5]	1800	-[2]	- [2]	- [2]	- [2]	- [2]	- [2]
	s_t (mm)	145	410	600	720	810	885	945	985	1040	-	-	-	-	-	-
	t/s_t (dias/mm)	1,38	0,98	1,00	1,11	1,24	1,36	1,48	1,62	1,73	-	-	-	-	-	-
	$\text{tg } \beta (\times 10^{-4})$	-20,0	+1,0	+5,5	+6,5	+6,0	+6,0	+7,0	+5,5	-	-	-	-	-	-	-
	s_f (cm)	[6]	1000,0	181,8	153,9	166,7	166,7	142,9	181,8	-	-	-	-	-	-	-
2ª FASE DE CARREGAMENTO	t (dias)[1]	60[3]	80[4]	100[4]	120[4]	140[4]	160[4]	180[4]	200[4]	220[4]	240	260	280	300	320[5]	340
	s_t (mm)	23	102	200	319	353	391	425	451	478	501	530	551	571	592	614
	t/s_t (dias/mm)	2,61	0,78	0,50	0,38	0,40	0,41	0,42	0,44	0,46	0,48	0,49	0,51	0,53	0,54	0,55
	$\text{tg } \beta (\times 10^{-4})$	-280,0	-140,0	-60,0	+10,0	+5,0	+5,0	+10,0	+10,0	+10,0	+5,0	+10,0	+10,0	+5,0	+5,0	-
	s_f (cm)	[6]	[6]	[6]	100,0	200,0	200,0	100,0	100,0	100,0	200,0	100,0	100,0	200,0	200,0	-

NOTAS:

- [1] O tempo t representa o número de dias decorrido do início da construção da respectiva fase de carregamento.
 [2] Na fase de carregamento em questão o referido ponto não foi analisado.
 [3] Foi admitido como 1800 dias o tempo de início da construção da 2ª fase de carregamento.
 [4] Valores correspondentes ao período do final da construção até 6 meses após o término da construção da respectiva fase de carregamento.
 [5] Valores correspondentes às últimas medições de dados realizados.
 [6] Valores negativos.

TABELA IV.22. VALORES DE RECALQUES FINAIS CALCULADOS PELO MÉTODO DE TAN

S E Ç Ã O		D								
P O N T O S		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1ª FASE DE CARREGAMENTO	t (dias)[1]	200	400[4]	600	800	1000	1200	1400	1600[5]	1800
	s_t (mm)	300	761	1067	1200	1305	1372	1433	1472	1500
	t/s_t (dias/mm)	0,67	0,53	0,56	0,67	0,77	0,88	0,98	1,09	1,20
	$tg\beta(x10^{-4})$	-7,0	+1,5	+5,5	+5,0	+5,5	+5,0	+5,5	+5,5	-
	s_f (cm)	[6]	666,7	181,8	200,0	181,8	200,0	181,8	181,8	-
2ª FASE DE CARREGAMENTO	t (dias)[1]	50[3]	100[4]	150[4]	200	250	300[5]	350	-[2]	-[2]
	s_t (mm)	166	278	373	444	501	560	610	-	-
	t/s_t (dias/mm)	0,30	0,36	0,40	0,45	0,50	0,54	0,57	-	-
	$tg\beta(x10^{-4})$	+12,0	+8,0	+10,0	+10,0	+8,0	+6,0	-	-	-
	s_f (cm)	83,3	125,0	100,0	100,0	125,0	166,7	-	-	-

Notas:

- [1] O tempo t representa o número de dias decorrido do início da construção da respectiva fase de carregamento.
- [2] Na fase de carregamento em questão o referido ponto não foi analisado.
- [3] Foi admitido como 1800 dias o tempo de início da construção da 2ª fase de carregamento.
- [4] Valores correspondentes ao período do final da construção até 6 meses após o término da construção da respectiva fase de carregamento.
- [5] Valores correspondentes às últimas medições de dados realizados.
- [6] Valores negativos.

TABELA IV.23. VALORES DE RECALQUES FINAIS CALCULADOS PELO MÉTODO DE TAN

S E Ç Ã O		E							
P O N T O S		1	2	3	4	5	6	7	8
1ª FASE DE CARREGAMENTO	t (dias)	200	400[4]	600	800	1000	1200	1400[5]	1600
	s _t (mm)	50	300	535	680	790	880	965	1025
	t/s _t (dias/mm)	4,0	1,33	1,12	1,18	1,27	1,36	1,45	1,56
	tgβ(x10 ⁻⁴)	-133,5	-10,5	+3,0	+4,5	+4,5	+4,5	+5,5	-
	s _f (cm)	[6]	[6]	333,3	222,2	222,2	222,2	181,8	-
2ª FASE DE CARREGAMENTO	t (dias)	50[3]	100[4]	150[4]	200	250	300[5]	350	-[2]
	s _t (mm)	117	217	300	367	429	483	529	-
	t/s _t (dias/mm)	0,43	0,46	0,50	0,55	0,58	0,62	0,66	-
	tgβ(x10 ⁻⁴)	+6,0	+8,0	+10,0	+6,0	+8,0	+8,0	-	-
	s _f (cm)	166,7	125,0	100,0	166,7	125,0	125,0	-	-

NOTAS

- [1] O tempo t representa o número de dias decorrido do início da construção da respectiva fase de carregamento.
- [2] Na fase de carregamento em questão o referido ponto não foi analisado.
- [3] Foi admitido como 1850 dias o tempo de início da construção da 2ª fase de carregamento.
- [4] Valores correspondentes ao período do final da construção até 6 meses após o término da construção da respectiva fase de carregamento.
- [5] Valores correspondentes às últimas medições de dados realizados.
- [6] Valores negativos.

TABELA IV.24. VALORES DE RECALQUES FINAIS CALCULADOS PELO MÉTODO DE TAN

S E Ç Ã O		F								
P O N T O S		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1ª FASE DE CARREGAMENTO	t (dias) ^[1]	200	400 ^[4]	600	800	1000	1200	1400	1600 ^[5]	1800
	s _t (mm)	87	300	560	720	827	914	981	1047	1107
	t/s _t (dias/mm)	2,30	1,33	1,07	1,11	1,21	1,31	1,43	1,53	1,63
	tg β (x10 ⁻⁴)	-49,0	-13,0	+2,0	+5,0	+5,0	+6,0	+5,0	+5,0	-
	s _f (cm)	[6]	[6]	500,0	200,0	200,0	166,7	200,0	200,0	-
2ª FASE DE CARREGAMENTO	t (dias) ^[1]	50 ^[3]	100 ^[4]	150 ^[4]	200	250	300 ^[5]	350	- ^[2]	- ^[2]
	s _t (mm)	138	225	300	363	418	468	513	-	-
	t/s _t (dias/mm)	0,36	0,44	0,50	0,55	0,60	0,64	0,68	-	-
	tg β (x10 ⁻⁴)	+16,0	+12,0	+10,0	+10,0	+8,0	+8,0	-	-	-
	s _f (cm)	62,5	83,3	100,0	100,0	125,8	125,0	-	-	-

NOTAS

- [1] O tempo t representa o número de dias decorrido do início da construção da respectiva fase de carregamento.
- [2] Na fase de carregamento em questão o referido ponto não foi analisado.
- [3] Foi admitido como 1850 dias o tempo de início da construção da 2ª fase de carregamento.
- [4] Valores correspondentes ao período do final da construção até 6 meses após o término da construção da respectiva fase de carregamento.
- [5] Valores correspondentes às últimas medições de dados realizados.
- [6] Valores negativos

TABELA IV.25. VALORES DE RECALQUES FINAIS CALCULADOS PELO MÉTODO DE TAN

S E C Ç Ã O		G								
P O N T O S		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1ª FASE DE CARREGAMENTO	t (dias)	200	400	600[4]	800	1000	1200	1400	1600[5]	1800
	s_t (mm)	129	258	400	525	612	687	746	796	854
	t/s_t (dias/mm)	1,55	1,54	1,50	1,52	1,63	1,75	1,88	2,01	2,11
	$tg \beta (\times 10^{-4})$	-0,5	-2,0	+1,0	+5,5	+6,0	+6,5	+6,5	+5,0	-
	s_f (cm)	[6]	[6]	1000,0	181,8	166,7	153,9	153,9	200,0	-
2ª FASE DE CARREGAMENTO	t (dias)	50[3]	100[4]	150[4]	200[4]	250	300	350[5]	400	- [2]
	s_t (mm)	36	128	184	225	264	288	323	348	-
	t/s_t (dias/mm)	1,39	0,78	0,82	0,89	0,95	1,04	1,08	1,15	-
	$tg \beta (\times 10^{-4})$	-122,0	+8,0	+14,0	+12,0	+18,0	+8,0	+14,0	-	-
	s_f (cm)	[6]	125,0	71,4	83,3	55,6	125,0	71,4	-	-

Notas:

- [1] O tempo t representa o número de dias decorrido do início da construção da respectiva fase de carregamento.
- [2] Na fase de carregamento em questão o referido ponto não foi analisado.
- [3] Foi admitido como 1800 dias o tempo de início da construção da 2ª fase de carregamento.
- [4] Valores correspondentes ao período do final da construção até 6 meses após o término da construção da respectiva fase de carregamento.
- [5] Valores correspondentes às últimas medições de dados realizados.
- [6] Valores negativos.

não se aplica o que pode ser verificado na maioria das seções, nas 1ª e 2ª fases de carregamento através de valores de recalques finais negativo e valores muito altos. De qualquer forma, observa-se que os valores de s_f calculados para uma mesma seção oscilam bastante ao longo do tempo.

Outra alternativa de cálculo foi estimar um valor de s_f médio a partir de um valor de $\beta_{\text{médio}}$, não se levando em consideração somente os pontos próximos à origem, seguindo recomendações de TAN. Estes resultados estão apresentados a seguir.

IV.8. CÁLCULO DOS RECALQUES FINAIS E COEFICIENTES DE ADENSAMENTO PELO MÉTODO DE ASAOKA

O cálculo dos recalques finais e dos coeficientes de adensamento vertical e horizontal, foi efetuado, pelo método de ASAOKA modificado por MAGNAN e DEROY, para todas as seções do aterro, já que este método pode ser utilizado para drenagem vertical e horizontal.

O método foi aplicado às curvas apresentadas nos gráficos IV.1 à IV.13.

Os cálculos foram realizados obedecendo os seguintes critérios:

- (a) Cálculos para um valor de Δt igual a 40 dias; a escolha deste valor baseou-se em um estudo da influência do valor de Δt apresentado no item IV.8 do presente trabalho.

- (b) Cálculos para dois períodos de tempo: para aproximadamente 6 meses contados após o término do carregamento, conforme representação esquemática da Figura IV.25 e para todas as medições disponíveis, também a partir do término do carregamento.

A adoção do primeiro critério acima teve como objetivo verificar resultados do método para um curto período de observação e de interesse para a prática da engenharia. Os valores obtidos estão apresentados nas tabelas IV.26 e IV.27 e gráficos IV.26 à IV.30.

- (c) Cálculos para compressão primária e secundária, conforme representação esquemática na figura(III.5(c)) e apresentados nas tabelas e gráficos citados acima.
- (d) Cálculos isolados, para as 1ª e 2ª fases de carregamento, conforme descrito para os métodos anteriores.

IV.8.1. Influência do Intervalo de tempo Δt

Com o objetivo de se avaliar a influência dos intervalos de tempo Δt nos resultados de recalques finais s_f e coeficientes de adensamento c_v e c_h foi escrito um programa de computador devido a repetibilidade dos cálculos, já que os resultados apresentados no item IV.8 foram manuais. O programa, assim desenvolvido, e chamado de "Programa Asaoka" será apresentado no Apêndice C. O programa testa a correlação da reta de inclinação β_1 , e se esta for inferior a 0,999 o primeiro ponto plotado no gráfico $s(t)_n$ e $s(t)_{n+1}$ é abandonado, sendo este procedimento repetido até

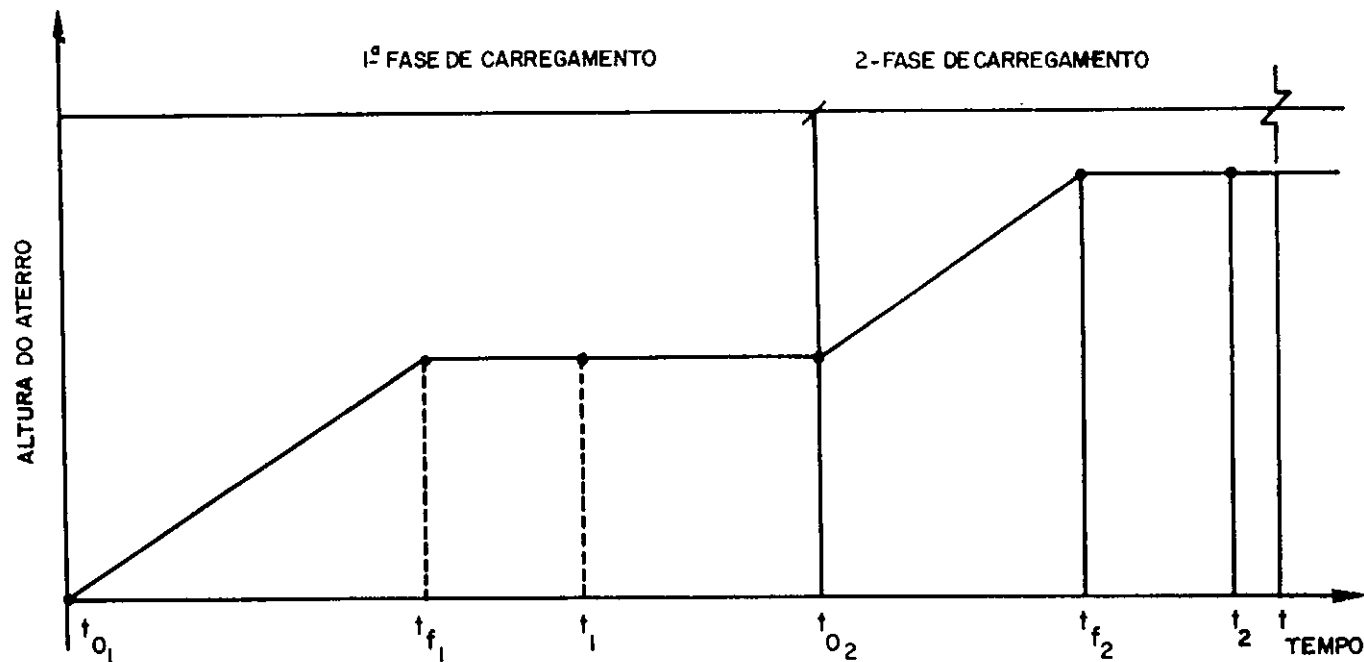


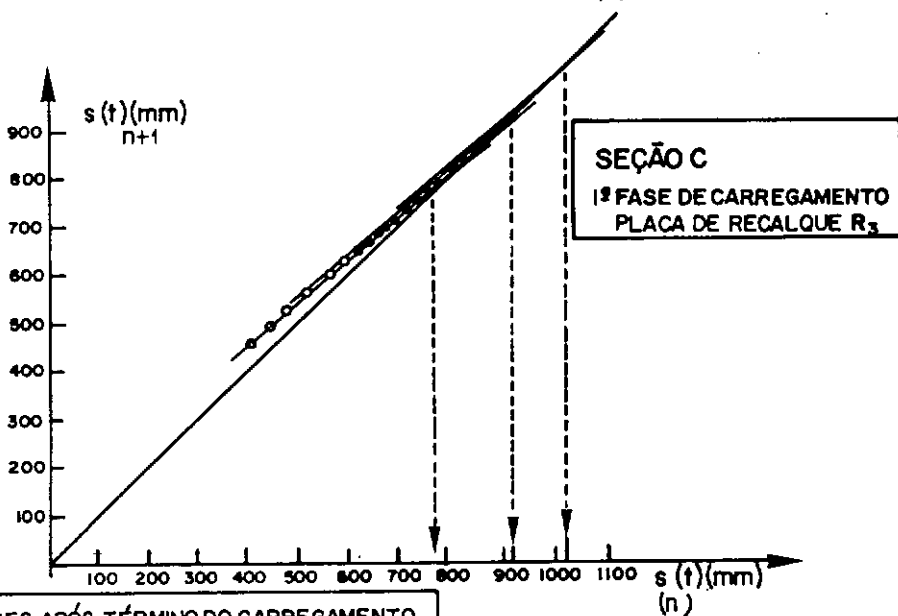
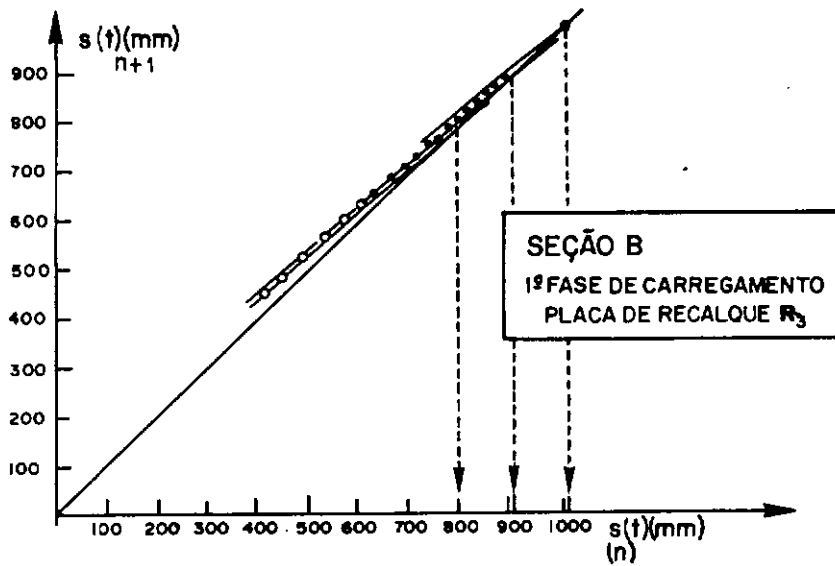
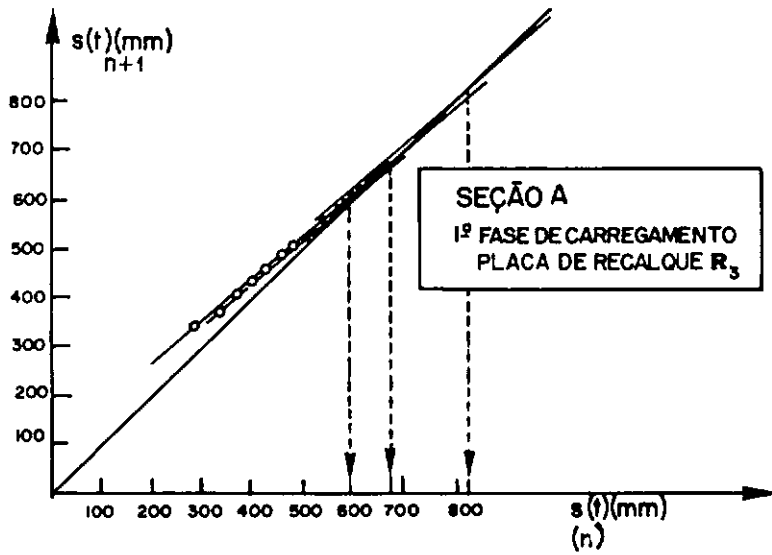
Figura IV. 25 - Representação esquemática da variação de altura do aterro em função dos períodos de tempo utilizados no cálculo pelo método de ASOKA

TABELA IV.26. VALORES DE RECALQUE FINAL E COEFICIENTES DE ADENSAMENTO CALCULADOS PELO MÉTODO DE ASAOKA, PARA $\Delta t = 40$ DIAS, COM MEDIÇÕES REALIZADAS NO PERÍODO APÓS O TÉRMINO DO CARREGAMENTO ATÉ 6 MESES APÓS O TÉRMINO DO CARREGAMENTO

S E Ç Ã O		A	B	C	D	E	F	G
1ª FASE DE CARREGAMENTO	s_f (cm)	60	80	78	117	77	72	55
	β_1	0,8621	0,8824	0,8519	0,7872	0,8649	0,8235	0,7813
	c_v (cm ² /s) x 10 ⁻⁴	48,0	-	-	-	-	-	58,6
	c_h (cm ² /s) x 10 ⁻⁴	-	4,5	5,8	8,6	5,6	8,6	-
2ª FASE DE CARREGAMENTO	s_f (cm)	-	78	73	78	70	70	58
	β_1	-	0,8529	0,8113	0,8529	0,8571	0,8571	0,8824
	c_v (cm ² /s) x 10 ⁻⁴	-	-	-	-	-	-	29,7
	c_h (cm ² /s) x 10 ⁻⁴	-	5,7	7,5	5,7	6,0	6,8	-

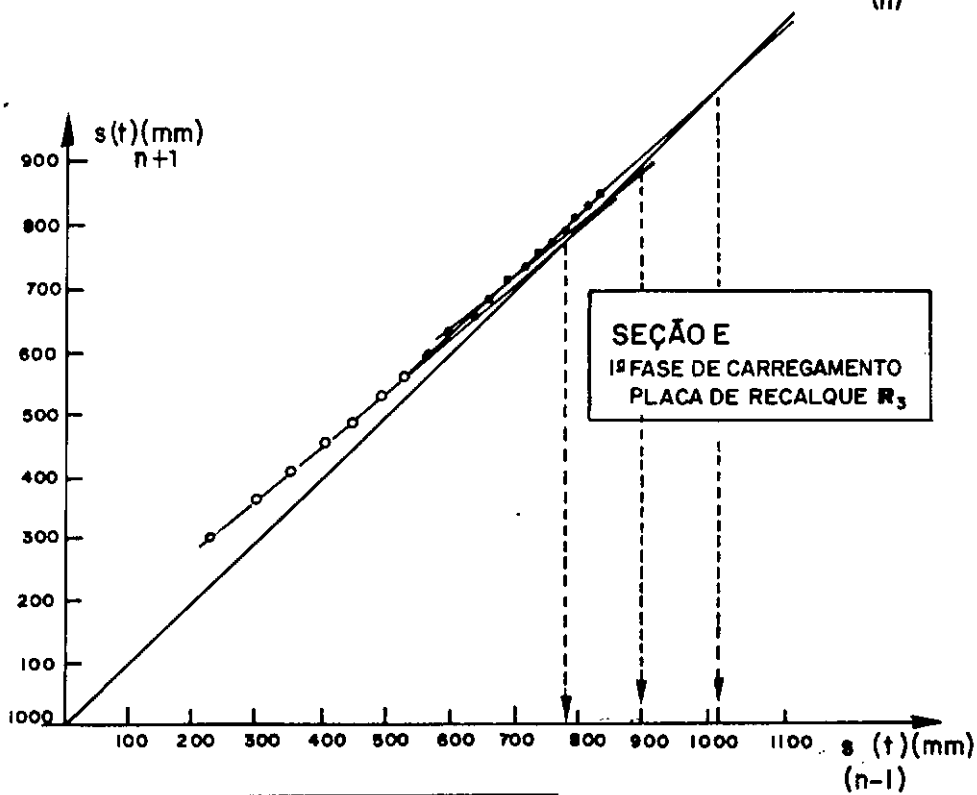
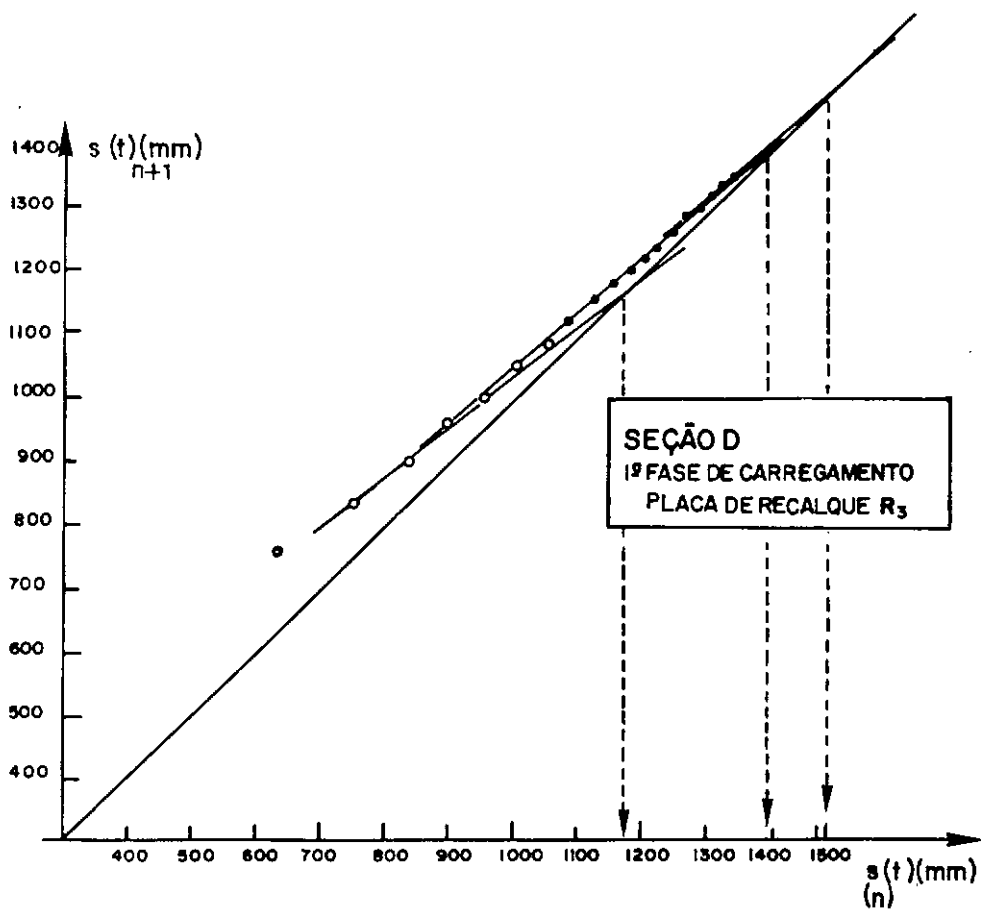
TABELA IV.27. VALORES DE RECALQUE FINAL, RECALQUE SECUNDÁRIO E COEFICIENTES DE ADENSAMENTO CALCULADOS PELO MÉTODO DE ASAOKA PARA $\Delta t = 40$ DIAS, COM TODAS AS MEDIÇÕES REALIZADAS

S E Ç Ã O		A	B	C	D	E	F	G
1ª FASE DE CARREGAMENTO	s_f (cm)	68	91	91	138	90	102	67
	β_1	0,8636	0,8913	0,8765	0,8421	0,9000	0,9123	0,8710
	c_v (cm ² /s)x10 ⁻⁴	47,4	-	-	-	-	-	32,8
	c_h (cm ² /s)x10 ⁻⁴	-	4,1	4,7	6,2	4,1	4,1	-
	s_{sec} (cm)	81	115	115	149	103	120	85
2ª FASE DE CARREGAMENTO	s_f (cm)	-	80	73	78	70	70	58
	β_1	-	0,8889	0,8113	0,8529	0,8571	0,8571	0,8824
	c_v (cm ² /s)x10 ⁻⁴	-	-	-	-	-	-	29,7
	c_h (cm ² /s)x10 ⁻⁴	-	4,2	7,5	5,7	6,0	6,8	-



ooooo - 6 MESES APÓS TÉRMINO DO CARREGAMENTO
●●●●● - TODAS AS MEDIÇÕES REALIZADAS

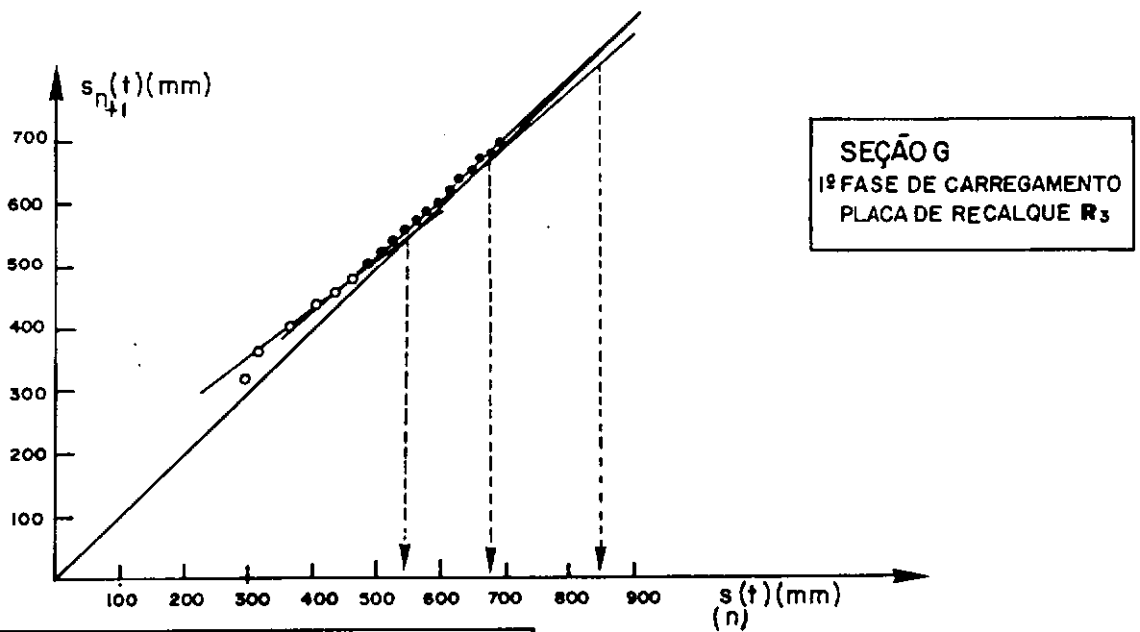
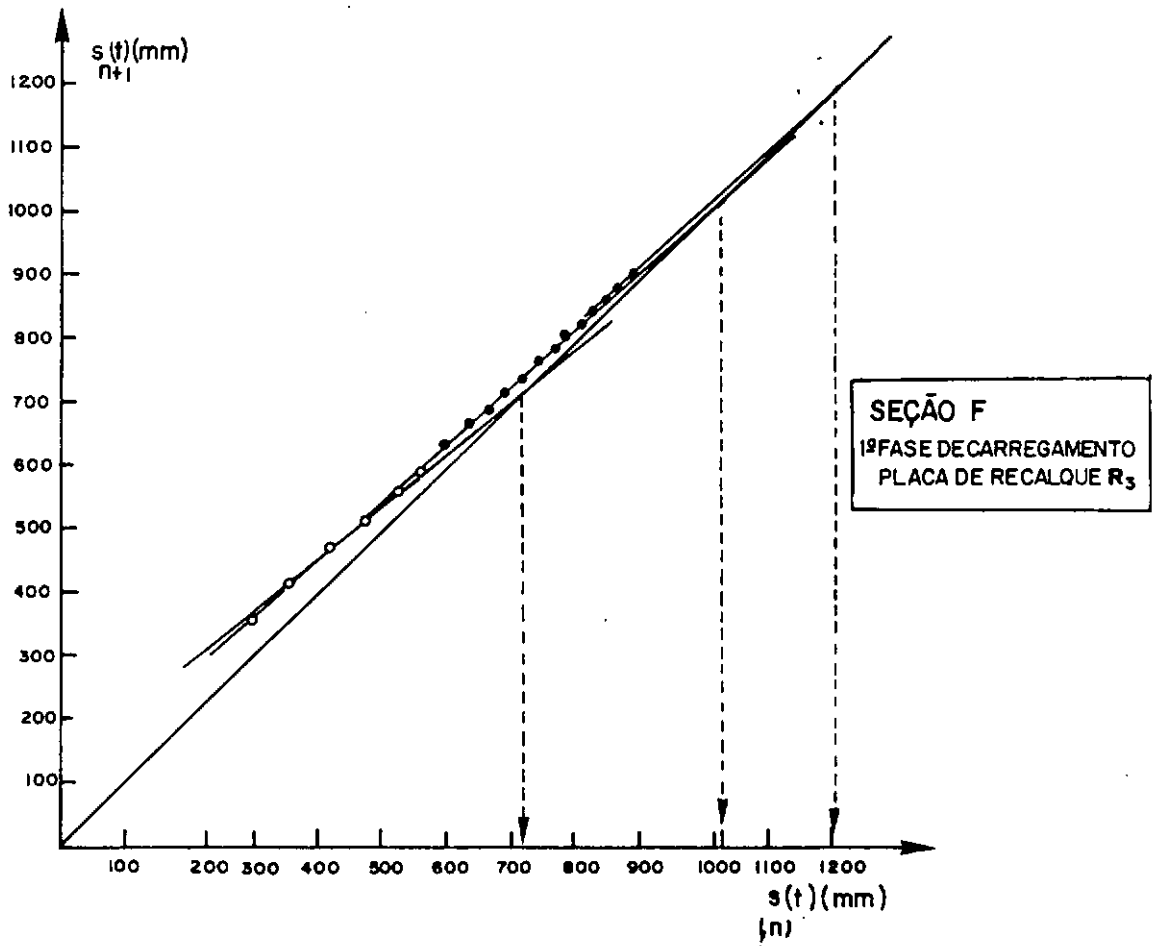
Figura IV-26 Gráficos $s(t)_{n+1}$ vs $s(t)_n$ necessários ao cálculo pelo Método de ASAOKA



oooo- 6 MESES APÓS O TÉRMINO DO CARREGAMENTO
●●●●- TODAS AS MEDIÇÕES REALIZADAS

Figura IV.-27 Gráficos $s(t)_{n+1}$ x $s(t)_n$
de ASAOKA

necessários ao cálculo pelo Método



○ ○ ○ ○ ○ - 6 MESES APÓS O TÉRMINO DO CARREGAMENTO
● ● ● ● ● - TODAS AS MEDIÇÕES REALIZADAS

Figura IV-28 Gráficos $s(t) \times s(t)_n$ necessários ao cálculo pelo Método de ASAOKA

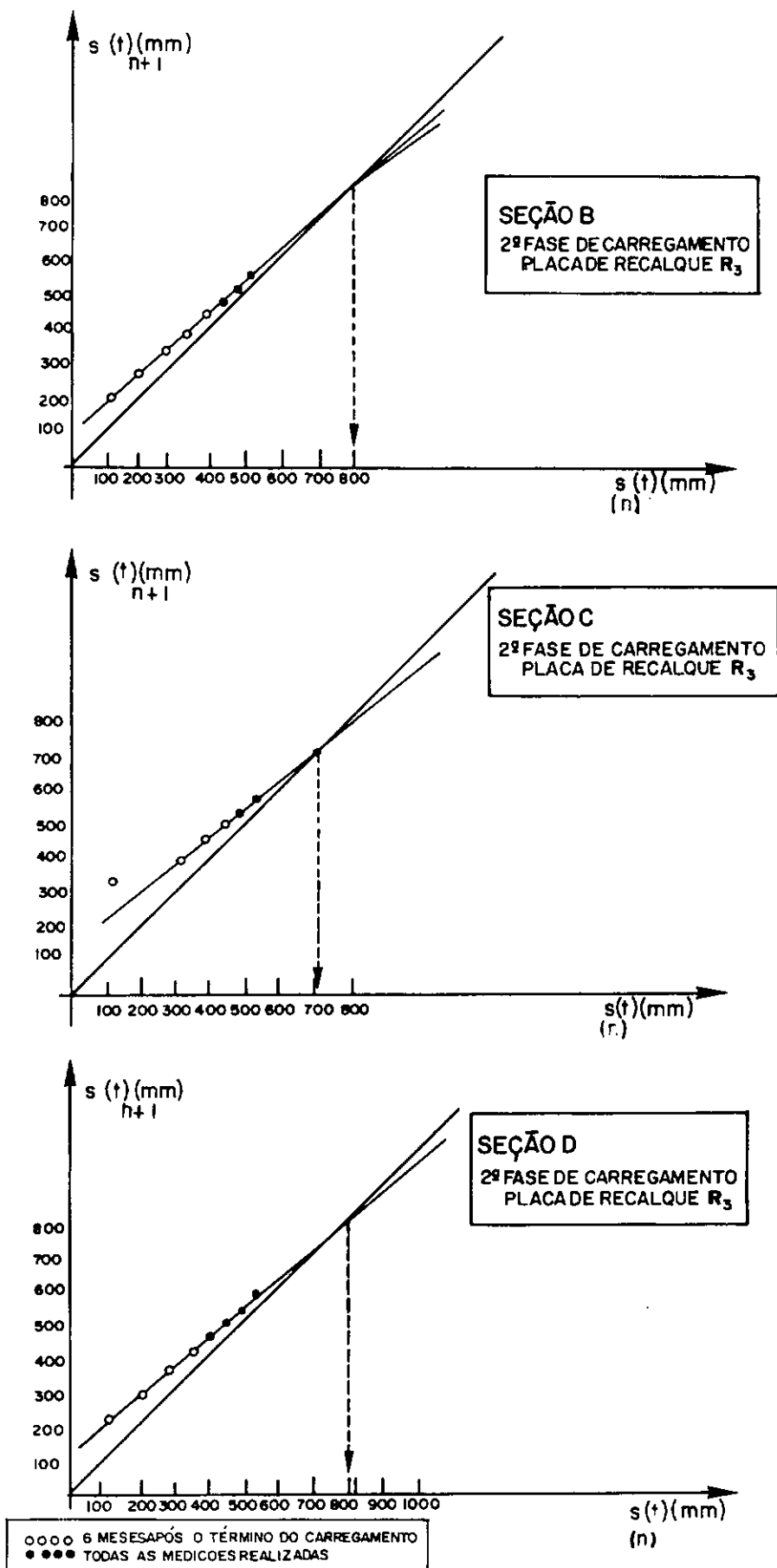
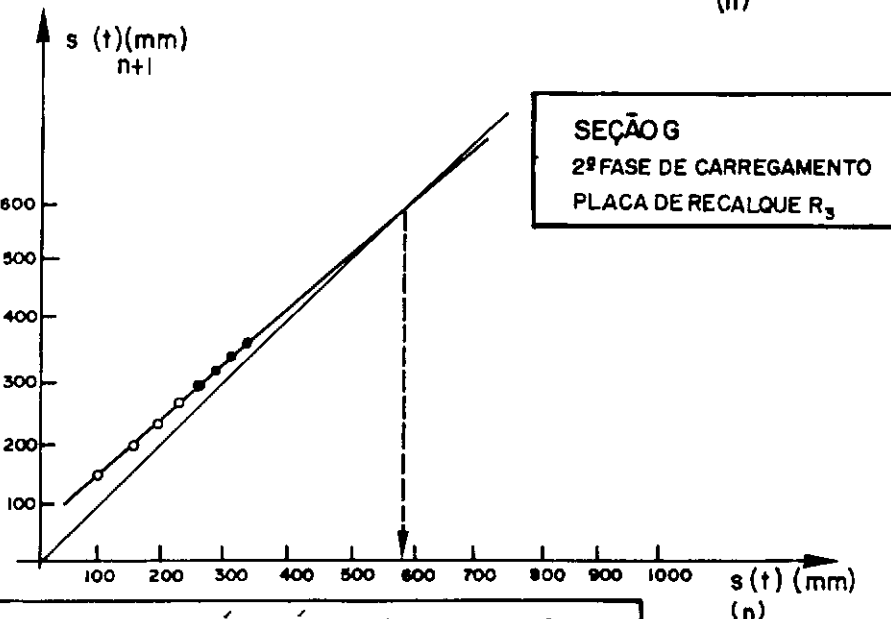
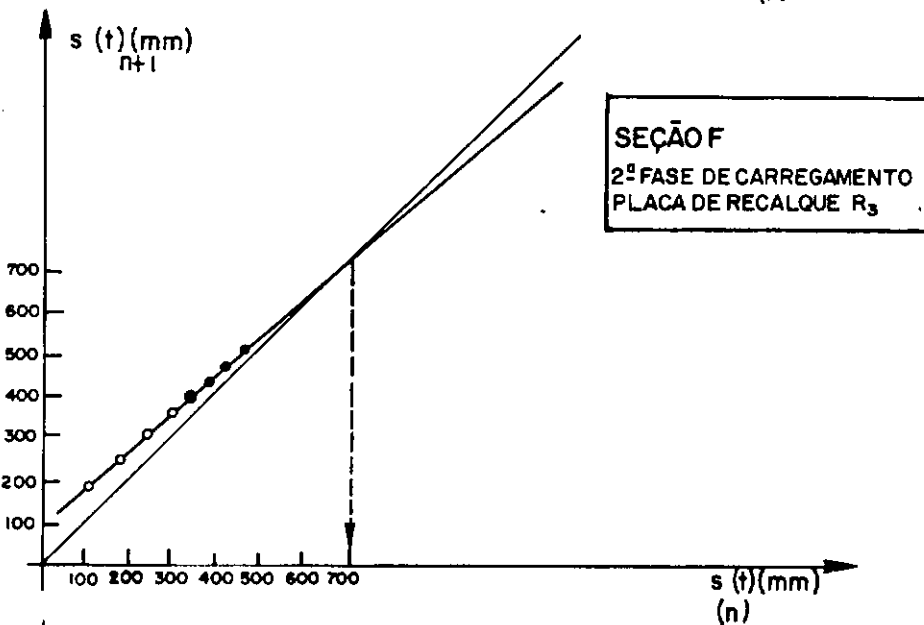
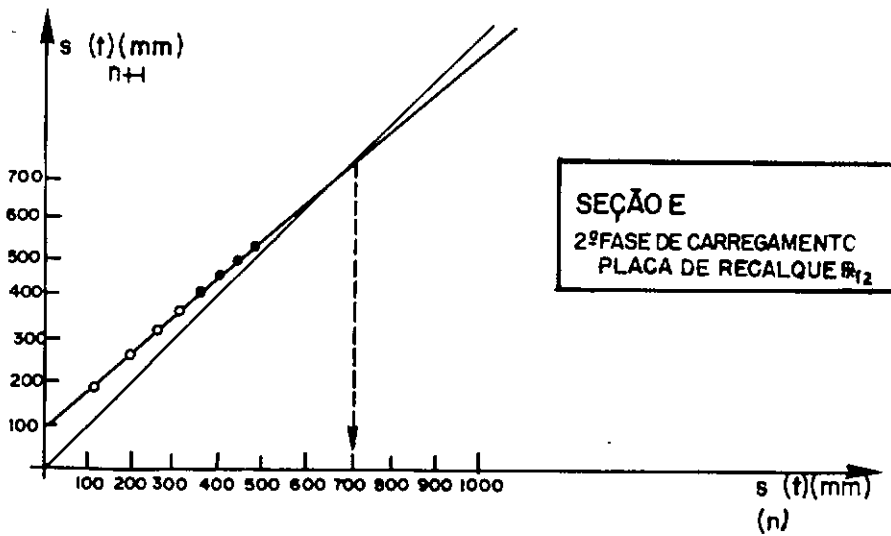


Figura.IV.29 Gráficos $s(t) \times s(t)$ necessários ao cálculo pelo Método de ASAOKA



○ ○ ○ ○ ○ - 6 MESES APÓS O TÉRMINO DO CARREGAMENTO
● ● ● ● ● - TODAS AS MEDIÇÕES REALIZADAS

Figura IV.30 - Gráficos $s(t)$ x $s(t)$ necessários ao cálculo pelo Método de ASAKA

que aquela correlação seja obtida. Outra característica do programa é traçar somente uma reta de inclinação β_1 no gráfico $s(t)_n \times s(t)_{n+1}$ e com isto não é separado o valor de recalque final do valor de recalque devido à compressão secundária este fato tem também influência nos resultados de c_v e c_h uma vez que estes são funções de β_1 . Entretanto acredita-se que as características acima do programa não influenciam significativamente os resultados fossem eles obtidos manualmente, uma vez que o que se está interessado aqui é na variação dos resultados em função do Δt e não no valor absoluto dos resultados.

O estudo da influência do tempo foi efetuado para todas as seções na 1ª fase do carregamento utilizando-se todas as medições disponíveis e para oito valores de Δt variando entre 30 e 100 dias. Os resultados de s_f , c_v e c_h desse estudo são apresentados na tabela IV.28. Observa-se que valores de s_f variam em um intervalo relativamente pequeno e que a relação entre o menor e o maior valor de recalques para a mesma seção é em média 85%, variando na faixa de 74% a 90%. Na seção E, por exemplo em que a relação acima foi de 90% os valores mínimo e máximo de recalques foi de 107mm e de 119mm. Por outro lado, a faixa de valores de c_v ou c_h obtida foi mais ampla, sendo a relação entre o menor e o maior valor de c_v ou c_h , para a mesma seção é em média 60%, variando na faixa de 55% à 76%.

Com base nos resultados acima conclui-se que o intervalo de tempo considerado tem alguma influência nos valores de s_f , c_v e c_h mas que tendo em vista a oscilação dos valores com Δt não existe uma correlação entre Δt e s_f ou entre Δt e c_v (ou c_h).

TABELA IV.28. VALORES DE s_f , c_v e c_h CALCULADOS PELO "PROGRAMA ASAOKA"

VALORES DE RECALQUE FINAL E COEFICIENTES DE ADENSAMENTO	Δt (dias)	30	40	50	60	70	80	90	100
SEÇÕES									
s_f (cm)	A	101	87	100	99	99	87	100	99
c_v (cm ² /s x 10 ⁻⁴)		13	23	13	14	14	23	13	14
s_f (cm)	B	114	107	110	111	115	110	128	131
c_h (cm ² /s x 10 ⁻⁴)		2,1	2,6	2,4	2,3	2,0	2,4	1,4	1,4
s_f (cm)	C	129	108	107	107	108	120	108	107
c_h (cm ² /s x 10 ⁻⁴)		1,4	2,6	2,7	2,7	2,6	1,7	2,6	2,7
s_f (cm)	D	164	149	162	162	150	146	149	148
c_h (cm ² /s x 10 ⁻⁴)		2,2	4,0	2,3	2,4	3,9	4,5	3,9	4,3
s_f (cm)	E	107	108	107	108	116	109	108	119
c_h (cm ² /s x 10 ⁻⁴)		2,8	2,7	2,8	2,7	2,2	2,7	2,7	2,0
s_f (cm)	F	139	143	159	168	147	124	136	136
c_h (cm ² /s x 10 ⁻⁴)		1,7	1,6	1,2	1,1	1,5	2,4	1,8	1,8
s_f (cm)	G	119	118	118	119	119	119	118	118
c_v (cm ² /s x 10 ⁻⁴)		7,6	7,5	7,5	7,6	7,6	7,6	7,5	7,5

Assim sendo foi arbitrado a utilização de um valor de $\Delta t = 40$ dias respaldada pela recomendação de MAGNAN e DERROY^[28] que sugerem a escolha de Δt na faixa de 30 a 90 dias.

IV.9. MÉTODO CONVENCIONAL DE RECALQUES FINAIS POR ADENSAMENTO

O cálculo dos recalques finais por adensamento pelo método foi realizado para todas as seções do aterro somente para a 2ª fase de carregamento, com base nas equações (III.9.1), (III.9.3) e (III.9.4) já que COLLET^[11] apresentou os valores calculados para a 1ª fase de carregamento. Os valores calculados por COLLET estão resumidos na tabela IV.29 do presente trabalho os dados necessários ao cálculo de $s(\infty)$ estão apresentados na Tabela IV.30 e os valores de $s(\infty)$ calculados para a 2ª fase estão mostrados nas Tabelas IV.31 à IV.36.

O efeito de submersão foi levado em conta quando se utilizou a equação (III.9.4), porém, um método alternativo para a consideração deste efeito é a utilização da equação abaixo (SANDRONI^[39]).

$$s(\infty) = \frac{m_v \cdot h' \cdot \Delta \sigma_v}{1 + m_v \cdot h' (\gamma_{\text{aterro}} - \gamma_{\text{sub,aterro}})} = \frac{s'(\infty)}{D} \quad (\text{IV.9.1})$$

onde

$$D = 1 + m_v h' (\gamma_{\text{aterro}} - \gamma_{\text{sub,aterro}})$$

γ_{aterro} = peso específico do aterro acima do nível d'água

$\gamma_{\text{sub,aterro}}$ = peso específico submerso do aterro

TABELA IV.29. RESUMO DOS VALORES DOS RECALQUES FINAIS POR ADENSAMENTO $s(\infty)$, APUD, COLLET^[11]
REFERENTE AOS VALORES DA 2ª ETAPA DE CARREGAMENTO E À 1ª FASE DE CARREGAMENTO
NO PRESENTE TRABALHO

SEÇÃO	A	B	C	D	E	F	G
$s(\infty)$ (cm)	115	120	124	145	125	127	121

TABELA IV. 30. CÁLCULO DOS PARÂMETROS NECESSÁRIOS AO CÁLCULO DO RECALQUE FINAL POR - ADENSAMENTO $s(\infty)$, DA 2ª FASE DO CARREGAMENTO, LEVANDO EM CONTA O EFEITO DA SUBMERSÃO

SEÇÃO	h' (m)	ESPESSURA DO MATERIAL DO ATERRO DEPOSITADO NA 2ª FASE DE CARREGAMENTO (m)	$\Delta\sigma_v$ (KN/m ²)	$s'(\infty)$ (φ)	$\overline{\Delta\sigma_v}$ KN/m ²
A	10,5	-	-	-	-
B	9,3	1,70	62,0	1,73	53,5
C	9,3	1,70	63,6	1,77	54,1
D	9,0	1,70	68,5	1,85	59,0
E	8,9	1,70	62,6	1,67	53,9
F	8,7	1,70	65,5	1,71	56,7
G	8,1	1,70	65,6	1,59	57,0

TABELA IV. 31. VALOR DO RECALQUE FINAL POR ADENSAMENTO DA 2ª FASE DE CARREGAMENTO CALCULADO PELO MÉTODO CONVENCIONAL

S E C ã O B													
ESPESSURA DA SUB-DIVISÃO DA CAMA-DA DE AREILA (m)	ENSAIO	PROFUNDIDADE (m)	$\bar{\sigma}_{v0}$ (KN/m ²)	e_1	$\bar{\sigma}_{vm}$ (KN/m ²)	$e_{\bar{\sigma}_{vm}}$	C_c	C_r	$\frac{h_n}{1 + e_1}$	$\Delta \bar{\sigma}_v$ (KN/m ²)	$C_r \ln \left(\frac{\bar{\sigma}_{vm}}{\bar{\sigma}_{v0}} \right)$	$C_c \log \left(\frac{\bar{\sigma}_{v0} + \Delta \bar{\sigma}_v}{\bar{\sigma}_{vm}} \right)$	$s^1(\infty)$
1 $h_a = 2,99$	2 A	0,55 a 1,10	2,99	4,43	13,00	4,09	1,95	0,28	0,57	53,5	0,12	1,26	0,89
	4	1,95 a 2,50	7,45	4,05	18,00	3,70	2,38	0,23					
2 $h_a = 3,00$	7 A	3,80 a 4,35	13,89	3,97	21,50	3,72	2,13	0,26	0,63	52,8	0,06	0,96	0,54
	9	5,00 a 5,50	16,68	3,55	26,00	3,28	2,04	0,36					
3 $h_a = 1,99$	11	6,25 a 6,80	29,80	3,59	30,00	3,19	2,52	0,19	0,45	51,7	0,04	0,70	0,33
	13	7,40 a 7,95	24,92	3,22	44,00	2,81	1,84	0,20					
4 $h_a = 2,48$	16	9,25 a 9,80	31,94	2,80	53,00	2,59	1,51	0,14	0,69	49,4	0,04	0,37	0,28
	17	9,80 a 10,35	34,39	2,40	43,00	2,21	1,62	0,31					
													2,04

TABELA IV. 32 . VALOR DE RECALQUE FINAL POR ADENSAMENTO DA 2ª FASE DE CARREGAMENTO CALCULADO PELO MÉTODO CONVENCIONAL

S E C Ç Ã O C													
ESPESSURA DA SUBDIVISÃO DA CAMADA DE ARGILA (m)	ENSAIO	PROFUNDIDADE (m)	$\bar{\sigma}_{vo}$ (KN/m ²)	e_1	$\bar{\sigma}_{vm}$ (KN/m ²)	$e \bar{\sigma}_{vm}$	C_c	C_r	$\frac{h_a}{1 + e_1}$	$\Delta \bar{\sigma}_v$ (KN/m ²)	$C_r \log \left(\frac{\bar{\sigma}_{vm}}{\bar{\sigma}_{vo}} \right)$	$C_c \log \left(\frac{\bar{\sigma}_{vo} + \Delta \bar{\sigma}_v}{\bar{\sigma}_{vm}} \right)$	$s^1 (\infty)$
1 $h_a = 2,99$	2A	0,55 a 1,10	2,99	4,43	13,00	4,09	1,95	0,28	0,57	54,1	0,12	1,26	0,79
	4	1,95 a 2,50	7,45	4,05	18,00	3,70	2,38	0,23					
2 $h_a = 3,00$	7A	3,80 a 4,35	13,89	3,97	21,50	3,72	2,13	0,26	0,63	53,2	0,06	0,96	0,64
	9	5,00 a 5,50	16,68	3,55	26,00	3,28	2,04	0,36					
3 $h_a = 1,99$	11	6,25 a 6,80	20,80	3,59	30,00	3,19	2,52	0,19	0,45	52,0	0,04	0,70	0,33
	13	7,40 a 7,95	24,92	3,22	44,00	2,81	1,84	0,20					
4 $h_a = 2,48$	16	9,25 a 9,80	31,94	2,80	53,00	2,59	1,51	0,14	0,69	50,0	0,04	0,37	0,29
	17	9,80 a 10,35	34,39	2,40	43,00	2,21	1,62	0,31					
													2,05

TABELA IV. 33 . VALOR DO RECALQUE FINAL POR ADENSAMENTO DA 2ª FASE DE CARREGAMENTO PELO MÉTODO CONVENCIONAL

S E Ç Ã O D													
ESPESURA DA SUBDIVISÃO DA CAMADA DE ARGILA (m)	ENSAIO	PROFUNDIDADE (m)	$\bar{\sigma}_{vo}$ (KN/m ²)	e_1	$\bar{\sigma}_{vm}$ (KN/m ²)	$e_{\bar{\sigma}_{vm}}$	C_c	C_r	$\frac{h_a}{1 + e_1}$	$\Delta \bar{\sigma}_v$ (KN/m ²)	$C_r \log \left(\frac{\bar{\sigma}_{vm}}{\bar{\sigma}_{vo}} \right)$	$C_c \log \left(\frac{\bar{\sigma}_{vo} + \Delta \bar{\sigma}_v}{\bar{\sigma}_{vm}} \right)$	$s'(\infty)$
I $h_a = 2,99$	2A	0,55 a 1,10	2,99	4,43	13,00	4,09	1,95	0,28	0,57	59,0	0,12	1,34	0,83
	4	1,95 a 2,50	7,45	4,05	18,00	3,70	2,38	0,23					
2 $h_a = 3,00$	7A	3,80 a 4,35	13,89	3,97	21,50	3,72	2,13	0,26	0,63	56,4	0,06	1,00	0,67
	9	5,00 a 5,50	16,68	3,55	26,00	3,28	2,04	0,36					
3 $h_a = 1,99$	11	6,25 a 6,80	20,80	3,59	30,00	3,19	1,52	0,19	0,45	55,1	0,04	0,71	0,34
	13	7,40 a 7,95	24,92	3,22	44,00	2,81	1,84	0,20					
4 $h_a = 2,48$	16	9,25 a 9,80	31,94	2,80	53,00	2,59	1,51	0,14	0,69	53,0	0,04	0,40	0,30
	17	9,80 a 10,35	34,39	2,40	47,00	2,21	1,62	0,31					
													2,14

TABELA IV. 34. VALOR DE RECALQUE FINAL POR ADENSAMENTO DA 2ª FASE DE CARREGAMENTO CALCULADO PELO MÉTODO CONVENCIONAL

S E C Ç Ã O E													
ESPESSURA DA SUB-DIVISÃO DA CAMADA DE ARGILA (m)	ENSAIO	PROFUNDIDADE (m)	$\bar{\sigma}_{vo}$ (KN/m ²)	e_1	$\bar{\sigma}_{vm}$ (KN/m ²)	e_{vm}	C_c	C_r	$\frac{h_a}{1 + e_1}$	$\frac{\Delta \bar{\sigma}_v}{(\bar{\sigma}_v)}$ (KN/m ²)	$C_r \log(\frac{\bar{\sigma}_{vm}}{\bar{\sigma}_{vo}})$	$C_c \log(\frac{\bar{\sigma}_{vo} + \Delta \bar{\sigma}_v}{\bar{\sigma}_{vm}})$	$s^1(\infty)$
1 $h_a = 2,99$	2A	0,55 a 1,10	2,99	4,43	13,00	4,09	1,95	0,28	0,57	53,9	0,12	1,26	0,79
	4	1,95 a 2,50	7,45	4,05	18,00	3,70	2,38	0,23					
2 $h_a = 3,00$	7A	3,80 a 4,35	13,89	3,97	21,50	3,72	2,13	0,26	0,63	53,7	0,06	0,97	0,65
	9	5,00 a 5,50	16,68	3,55	26,00	7,28	2,04	0,36					
3 $h_a = 1,99$	11	6,25 a 6,80	20,80	7,59	30,00	3,19	2,52	0,19	0,45	52,2	0,04	0,67	0,32
	13	7,40 a 7,95	24,92	3,22	44,00	2,81	1,84	0,20					
4 $h_a = 2,20$	16	9,25 a 9,80	31,94	2,80	53,00	2,59	1,51	0,14	0,61	50,0	0,04	0,37	0,25
	17	9,80 a 10,35	34,39	2,40	43,00	2,21	1,62	0,31					
													2,01

TABELA IV.35. VALOR DE RECALQUE FINAL POR ADENSAMENTO DA 2ª FASE DE CARREGAMENTO CALCULADO PELO MÉTODO CONVENCIONAL

S E Ç Ã O F													
ESPESURA DA SUBDIVISÃO DA CAMADA DE ARGILA (m)	ENSAIO	PROFUNDIDADE (m)	$\bar{\sigma}_{vo}$ (KN/m ²)	e_1	$\bar{\sigma}_{vm}$ (KN/m ²)	$e \bar{\sigma}_{vm}$	C_c	C_r	$\frac{h_a}{1 + e_1}$	$\frac{\Delta \bar{\sigma}_v}{\bar{\sigma}_{vm}}$ (KN/m ²)	$C_r \log \left(\frac{\bar{\sigma}_{vm}}{\bar{\sigma}_{vo}} \right)$	$C_c \log \left(\frac{\bar{\sigma}_{vo} + \Delta \bar{\sigma}_v}{\bar{\sigma}_{vm}} \right)$	$s'(\infty)$
1 $h_a = 2,99$	2A	0,55 a 1,10	2,99	4,43	13,00	4,09	1,95	0,28	0,57	56,7	0,12	1,30	0,81
	4	1,05 a 2,50	3,45	4,05	18,00	3,70	2,38	0,23					
2 $h_a = 3,00$	7A	3,80 a 4,35	13,89	3,97	21,50	3,72	2,13	0,26	0,63	56,0	0,06	1,00	0,67
	9	5,00 a 5,50	16,68	3,55	26,00	7,28	2,04	0,36					
3 $h_a = 1,99$	11	6,25 a 6,80	20,80	3,59	30,00	3,19	2,52	0,19	0,45	54,9	0,04	0,70	0,33
	13	7,40 a 7,95	24,92	3,22	44,00	2,81	1,84	0,20					
4 $h_a = 1,98$	16	9,25 a 9,80	31,94	2,80	53,00	2,59	1,51	0,14	0,55	52,5	0,04	0,39	0,24
	17	9,80 a 10,35	34,39	2,40	43,00	2,21	1,62	0,31					
													2,05

TABELA IV. 36. VALOR DO RECALQUE FINAL POR ADENSAMENTO DA 2ª FASE DE CARREGAMENTO CALCULADO PELO MÉTODO CONVENCIONAL

S E Ç Ã O G														
ESPESSURA DA SUB-DIVISÃO DA CAMADA DE ARGILA (m)	ENSAIO	PROFUNDIDADE (m)	$\bar{\sigma}_{vo}$ (KN/m ²)	e_i	$\bar{\sigma}_{vm}$ (KN/m ²)	$e \bar{\sigma}_{vm}$	C_c	C_r	$\frac{h_a}{1 + e_i}$	$\Delta \bar{\sigma}_v$ (KN/m ²)	$C_r \log(\frac{\bar{\sigma}_{vm}}{\bar{\sigma}_{vo}})$	$C_c \log(\frac{\bar{\sigma}_{vo} + \Delta \bar{\sigma}_v}{\bar{\sigma}_{vm}})$	$s'(\infty)$	
1 $h_a = 2,99$	2A	0,55 a 1,10	2,99	4,43	13,00	4,09	1,95	0,28	0,57	57,0	0,12	1,31	0,81	
	4	1,05 a 2,50	7,45	4,05	18,00	3,70	2,38	0,23						
2 $h_a = 3,00$	7A	3,80 a 4,35	13,89	3,97	21,50	3,72	2,13	0,26	0,63	56,4	0,06	1,00	0,67	
	9	5,00 a 5,50	16,68	3,55	26,00	3,28	2,04	0,36						
3 $h_a = 1,99$	11	6,25 a 6,80	20,80	3,59	30,00	3,19	2,52	0,19	0,68	55,9	0,04	0,72	0,53	
	13	7,40 a 7,95	24,92	3,22	44,00	2,81	1,84	0,20						
4 $h_a = 1,98$	16	9,25 a 9,80	31,94	2,80	53,00	2,59	1,51	0,14	-	-	-	-	-	
	17	9,80 a 10,35	34,39	2,40	43,00	2,21	1,62	0,31						
														2,01

A vantagem da equação acima é que os cálculos tornam-se mais simples.

Entretanto, optou-se por utilizar as equações descritas no capítulo III por consistência com os cálculos anteriores realizados por COLLET e apresentados no presente trabalho.

IV.10. RESUMO E COMENTÁRIOS FINAIS

Este capítulo apresentou cálculos de recalques e de coeficientes de adensamento utilizando os métodos descritos no capítulo III.

Com relação aos cálculos de recalques iniciais observou-se que os mesmos foram em média de 4cm, sendo portanto praticamente desprezíveis quando comparados aos recalques finais por adensamento, os quais variaram em geral entre 1 a 2 metros dependendo da seção considerada e da fase de carregamento. Ainda assim os recalques iniciais foram considerados nos cálculos dos recalques finais quando teoricamente deveriam sê-los.

Os métodos de ELLSTEIN, LONG e CAREY e TAN produziram para intervalos de tempos iniciais (principalmente na 1ª fase de carregamento) valores negativos de recalques finais s_f e de coeficiente de adensamento, c_v e c_h . Valores de s_f , c_v e c_h variaram para cada intervalo de tempo considerado, sem entretanto uma lei de variação bem definida. Uma análise da variação de c_v e c_h com o tempo é apresentada a seguir.

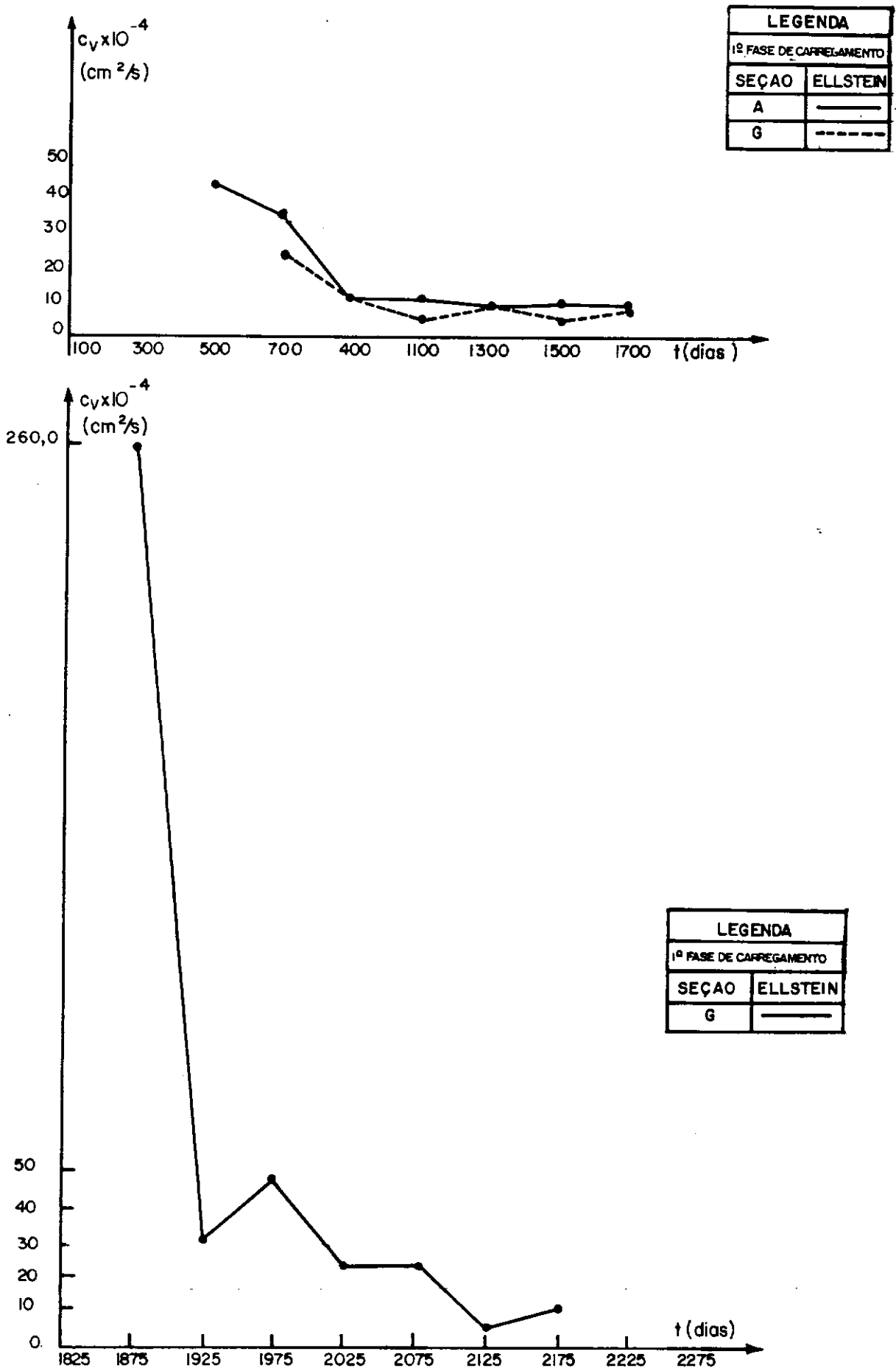
IV.10.1. Variações de c_v e c_h com o tempo

As variações de c_v (métodos de ELLSTEIN) com o tempo para as seções A e G e de c_h (métodos de LONG e CAREY com o tempo para as seções B à F durante a 1ª e 2ª fases do carregamento são apresentadas nas figuras IV.31 e IV.32, IV.33, respectivamente.

Excluídos os tempos iniciais da 1ª fase, quando foram obtidos valores de c_v e c_h negativos, observa-se uma clara tendência de diminuição de c_v e c_h com o tempo. Este comportamento é esperado considerando o aumento das tensões efetivas verticais $\bar{\sigma}_v$ na fundação e que a diminuição de c_v está relacionado com o aumento de $\bar{\sigma}_v$. Observa-se também uma certa oscilação dos valores de c_v e c_h para tempos maiores em cada fase, o que acredita-se ser devido aos baixos gradientes da curva recalque-tempo aliado à pequena diferença entre recalques para tempos consecutivos naquele intervalo, o que torna menos acurado o cálculo de c_v e c_h nessas circunstâncias.

IV.10.2. Valores médios de c_v e c_h dos métodos de ELLSTEIN e LONG e CAREY

Tendo em vista as variações de s_f , c_v e c_h com o tempo discutidas acima, cálculos de valores médios e representativos de s_f , c_v e c_h e também de recalques finais foram efetuadas para todas as seções pelos métodos de ELLSTEIN, LONG e CAREY



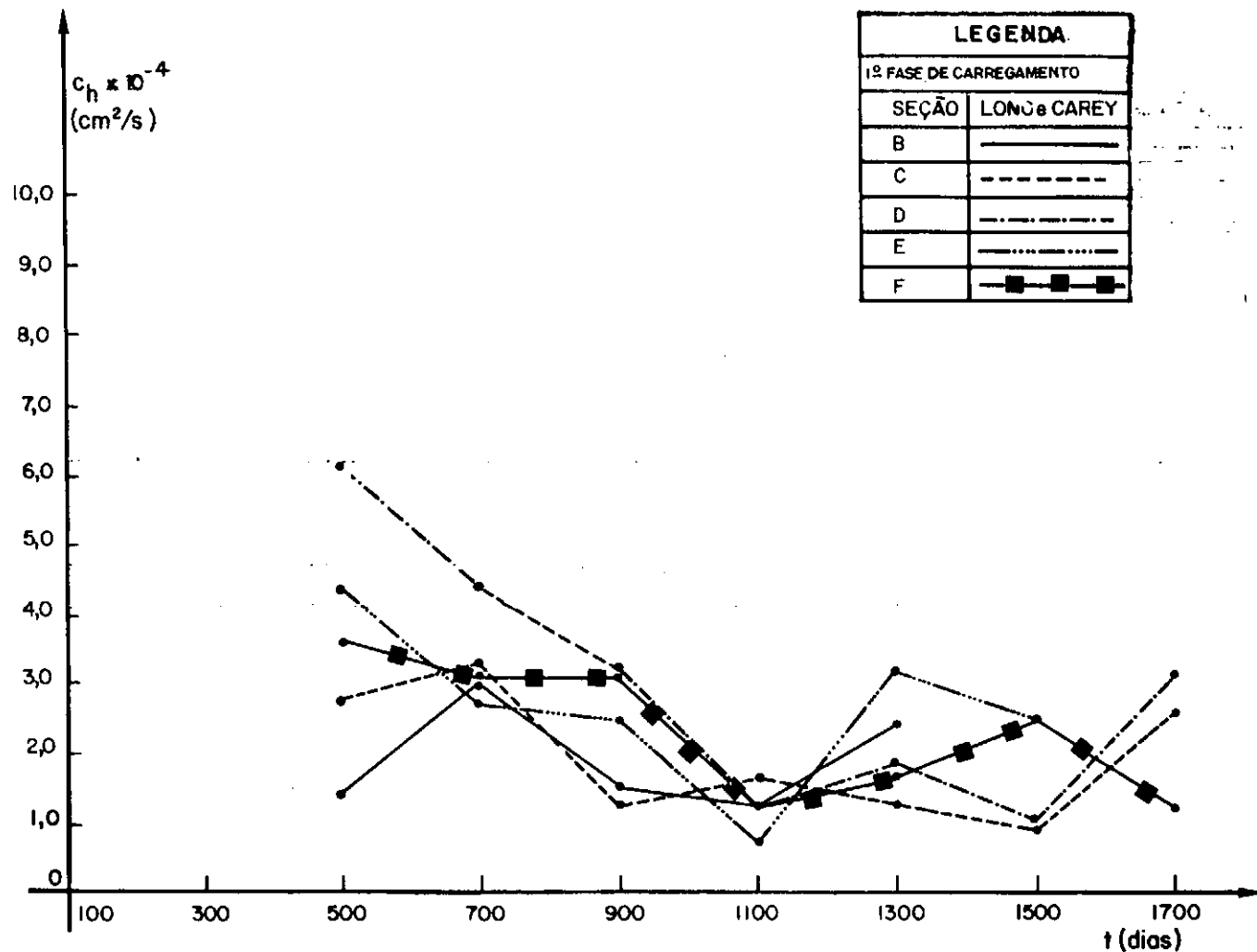


FIGURA IV-32 — Curvas de variação do coeficiente de adensamento ao longo do tempo

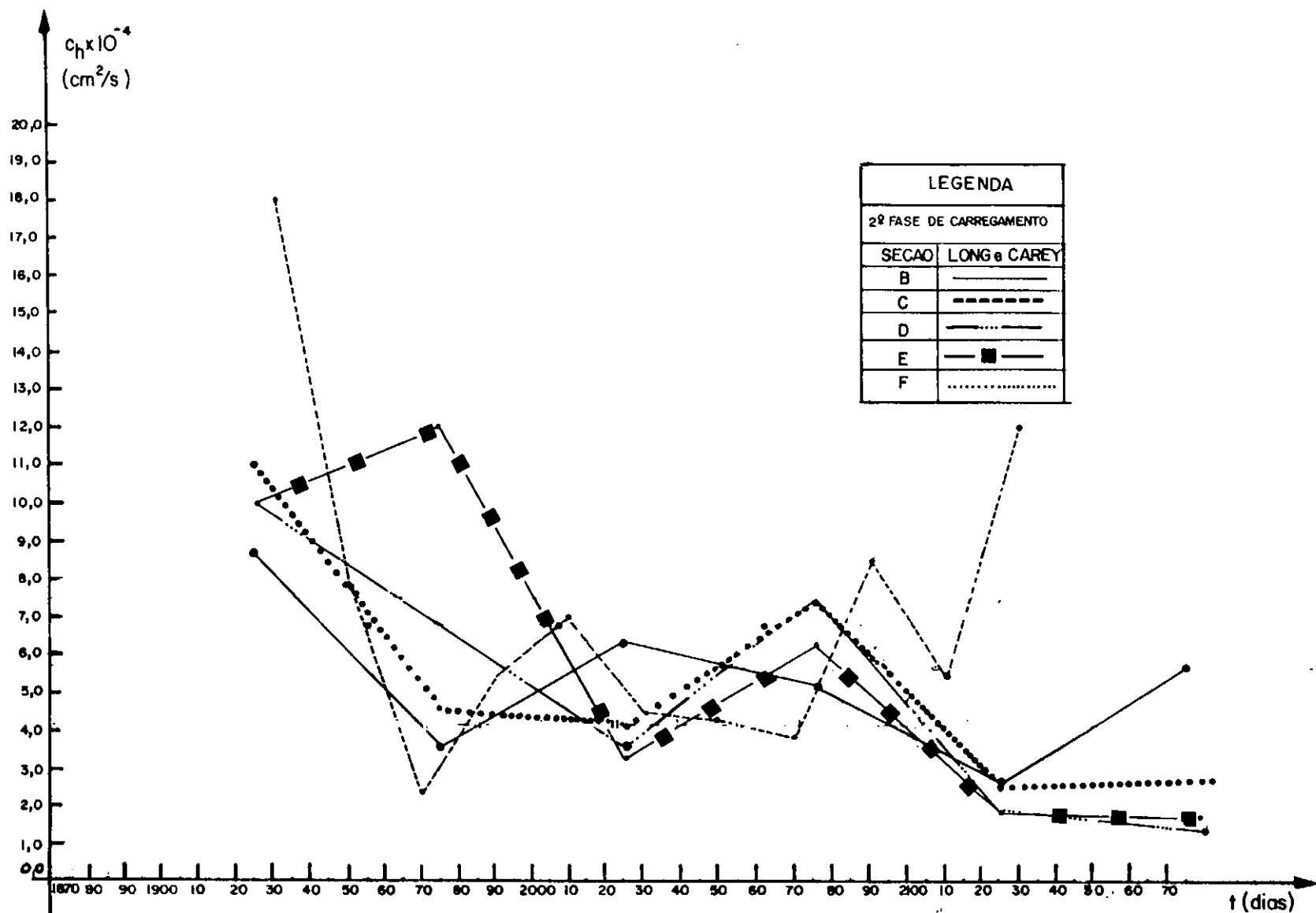


FIGURA IV-33 — Curvas de variação do coeficiente de adensamento ao longo do tempo

e TAN. Estes cálculos são apresentados nas tabelas IV.37 a IV.40 e servirão de base para as comparações com os resultados dos outros métodos, comparações essas a serem discutidas no capítulo V.

A tabela IV.37 apresenta cálculos utilizando dados de campo de até 6 meses após o carregamento na 2ª fase de carregamento para os quais foram arbitrados os tempos de 100 e 200 dias efetuados pelos métodos de ELLSTEIN (tabela IV.37(a)) e LONG e CAREY (tabela IV.37 (b)).

As tabelas IV.38 e IV.39 apresentam cálculos utilizando todas as medições realizada após o término do carregamento pelos métodos de ELLSTEIN e LONG e CAREY respectivamente. Os valores de recalque finais e coeficientes de adensamento da 1ª fase de carregamento foram obtidos para tempos arbitrados de 800 e 1400 dias e na 2ª fase de carregamento para tempos de 100 à 400 dias.

A tabela IV.40 apresenta os cálculos de recalques finais para tempos arbitrados de 800 e 1400 dias para a 1ª fase de carregamento e 100 à 300 dias para a 2ª fase, realizados pelo método de TAN.

Para o método de ASAKA observou-se alguma influência do valor do intervalo de tempo considerado nos resultados de s_f , c_v e c_h . Entretanto esta influência não é crítica sendo a faixa de valores de Δt entre 30 e 90 dias sugerida por MAGNAN e DEROUY^[29] aparentemente satisfatória.

TABELA IV.37. VALORES DE COEFICIENTE DE ADENSAMENTO E RECALQUE FINAL CALCULADOS PELOS MÉTODOS DE ELLSTEIN E LONG E CAREY PARA DOIS PONTOS ESCOLHIDOS ARBITRARIAMENTE NO CONJUNTO DE DADOS OBTIDOS COM AS MEDIÇÕES REALIZADAS DO FINAL DO CARREGAMENTO ATÉ 6 MESES APÓS O CARREGAMENTO.

S E Ç Ã O		G	
2ª FASE DE CARREGAMENTO	t (dias)	100	200
	c _v (cm ² /s)x10 ⁻⁴	52,0	
	s(∞) (cm)	38,1	
	s _f (cm)	42,1	

(a) Método de ELLSTEIN

S E Ç Ã O		B		C		D		E		F	
2ª FASE DE CARREGAMENTO	t (dias)	100	200	100	200	100	200	100	200	100	200
	tg α (x10 ⁻⁴)	18,56		76,46		15,87		17,14		10,76	
	c _{v,h} (cm ² /s)x10 ⁻⁴	6,2		25,0		5,3		6,1		4,3	
	s _f (cm)	67,9		50,3		82,0		67,7		85,4	

(b) Método de LONG e CAREY

TABELA IV.38. VALORES DE COEFICIENTE DE ADENSAMENTO E RECALQUE FINAL CALCULADOS PELO MÉTODO DE ELLSTEIN PARA DOIS PONTOS ESCOLHIDOS ARBITRARIAMENTE NO CONJUNTO DE DADOS OBTIDOS COM TODAS AS MEDIÇÕES REALIZADAS.

S E Ç Ã O		A		G	
1ª FASE DE CARREGAMENTO	t (dias)	800	1400	800	1400
	c_v (cm ² /s)x10 ⁻⁴	11,0		8,6	
	s(∞) (cm)	100,6		101,3	
	s _f (cm)	104,6		105,3	
2ª FASE DE CARREGAMENTO	t (dias)	-	-	200	400
	c_v (cm ² /s)x10 ⁻⁴	-	-	16,0	
	s(∞) (cm)	-	-	61,0	
	s _f (cm)	-	-	65,0	

TABELA IV.39. VALORES DE COEFICIENTE DE ADENSAMENTO E RECALQUE FINAL CALCULADOS PELO MÉTODO DE LONG E CAREY PARA DOIS PONTOS ESCOLHIDOS ARBITRARIAMENTE NO CONJUNTO DE DADOS OBTIDOS COM TODAS AS MEDIÇÕES REALIZADAS

S E Ç Ã O		B		C		D		E		F	
1ª FASE DE CARREGAMENTO	t (dias)	800	1400	800	1400	800	1400	800	1400	800	1400
	tg α ($\times 10^{-4}$)	5,30		4,29		6,57		5,95		5,02	
	$c_{v,h}$ (cm^2/s) $\times 10^{-4}$	1,50		1,20		1,80		2,1		2,0	
	s_f (cm)	59		122		159		119		124	
2ª FASE DE CARREGAMENTO	t (dias)	200	400	100	300	150	350	150	350	150	350
	tg α ($\times 10^{-4}$)	11,10		46,8		10,95		9,28		10,46	
	$c_{v,h}$ (cm^2/s) $\times 10^{-4}$	3,7		16,0		3,61		3,3		4,2	
	s_f (cm)	93		62		97		96		86	

TABELA IV.40. VALORES DE RECALQUE FINAL CALCULADOS PELOS MÉTODOS DE TAN PARA DOIS PONTOS ESCOLHIDOS ARBITRARIAMENTE NO CONJUNTO DE DADOS OBTIDOS COM TODAS AS MEDIÇÕES REALIZADAS.

1ª FASE DE CARREGAMENTO	S E Ç Ã O	A		B		C		D		E		F		G	
	t(dias)	800	1400	800	1400	800	1400	800	1400	800	1400	800	1400	800	1400
	s _t (mm)	575	758	735	975	720	945	1200	1433	680	965	720	981	525	746
	t/s _t (dias/mm)	1,39	1,85	1,09	1,44	1,11	1,48	0,67	0,98	1,18	1,45	1,11	1,43	1,52	1,88
	tg α x 10 ⁻⁴	7,67		5,83		6,17		5,17		4,5		5,33		6,0	
	s _f (cm)	130		172		162		193		222		188		167	
2ª FASE DE CARREGAMENTO	t(dias)	-	-	200	300	120	200	100	200	100	200	100	200	100	200
	s _t (mm)	-	-	345	475	319	451	278	444	217	367	225	363	128	225
	t/s _t (dias/mm)	-	-	0,59	0,63	0,38	0,44	0,36	0,45	0,46	0,55	0,44	0,55	0,78	0,89
	tg α x 10 ⁻⁴	-		4,0		7,5		9,0		9,0		11,0		11,0	
	s _f (cm)	-		250		133		111		111		91		91	

CAPÍTULO V

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

V.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão discutidos e comparados os resultados de recalques finais e coeficientes de adensamento apresentados no capítulo IV.

Os resultados de coeficientes de adensamento c_v e c_h obtidos da retro-análise de recalques serão comparados com os valores medidos através de ensaios de laboratório e de campo.

Serão também apresentadas curvas teóricas e medidas de recalque - tempo e de grau de adensamento - tempo.

Apresenta-se finalmente uma avaliação preliminar da eficiência dos drenos verticais.

V.2. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DE RECALQUES FINAIS

Os resultados de recalques finais calculados pelos métodos aqui utilizados com dados de até 6 meses após o carregamento são apresentados na tabela V.1. e os com todos os dados disponíveis são apresentados na tabela V.2. Os pontos a serem ressaltados destas tabelas são:

TABELA V.1. VALORES DE RECALQUE FINAL (cm) CALCULADOS COM AS MEDIÇÕES REALIZADAS NO PERÍODO DO TÉRMINO DA CONSTRUÇÃO ATÉ 6 MESES APÓS A CONSTRUÇÃO DA REFERIDA FASE DE CARREGAMENTO

FASE DE CARREGAMENTO	SEÇÃO MÉTODO	A	B	C	D	E	F	G
1ª	ELLSTEIN	64	-	-	-	-	-	71
	LONG e CAREY	-	146	101	130	84	106	-
	TAN ^[3]	133	222	182	182	222	200	182
	ASAOKA	60	80	78	117	77	72	55
	CONVENCIONAL	115	120	124	145	125	127	121
2ª	ELLSTEIN	-	-	-	-	-	-	42 [1]
	LONG e CAREY	-	68 [1]	50 [2]	82	68 [1]	85 [1]	-
	TAN	-	167	133 [2]	113 [1]	113 [1]	92 [1]	93 [1]
	ASAOKA	-	78	73	78	70	70	58
	CONVENCIONAL	-	81	81	69	76	78	80

NOTAS

[1] Valor médio do período acima descrito.

[2] Valor médio do período com exclusão dos valores negativos de recalque final.

[3] Os valores do recalque final calculados pelo método de TAN estão fora do período acima descrito.

TABELA V.2. VALORES DE RECALQUE FINAL (cm) CALCULADOS COM TODAS AS MEDIÇÕES REALIZADAS DESDE O TÉRMINO DO CARREGAMENTO

FASE DE CARREGA- MENTO	S E Ç Ã O M É T O D O	A	B	C	D	E	F	G
1ª	ELLSTEIN	105	-	-	-	-	-	105
	LONG e CAREY	-	59	122	159	119	124	-
	TAN	130	172	162	193	222	188	167
	ASAOKA	68	91	91	138	90	102	67
	ASAOKA com recal- que secundário	81	115	115	149	103	120	85
	CONVENCIONAL	115	120	124	145	125	127	121
2ª	ELLSTEIN	-	-	-	-	-	-	65
	LONG e CAREY	-	93	62	97	96	36	-
	TAN	-	250	133	111	111	91	91
	ASAOKA ^[1]	-	80	73	78	70	70	58
	CONVENCIONAL	-	84	81	69	76	78	80

NOTA

[1] Na 2ª fase de carregamento não foi calculado o recalque secundário

- (a) Os recalques finais das seções sem drenos A e G são em geral sensivelmente menores que os das seções com drenos B a F, tanto para a primeira como para a segunda fase de carregamento. Este resultado, foi obtido tanto com os dados de 6 meses como com todos os dados e também para o método convencional na 1ª fase de carregamento mas não na 2ª fase de carregamento;
- (b) Os recalques finais calculados das seções com drenos na 1ª fase de carregamento foram, a menos da seção D, relativamente próximos entre si; os maiores recalques finais previstos para a seção D devem-se, aparentemente, ao método construtivo utilizado nos drenos jateados o qual deve ter induzido mais perturbação no solo.
- (c) Os recalques finais calculados pelo método de TAN, os quais incluem também a compressão secundária, são bem maiores que os dos demais métodos, indicando ser a equação hiperbólica do método pouco adequada;
- (d) Os recalques calculados pelos métodos de velocidade de recalques (ELLSTEIN e LONG e CAREY) são razoavelmente próximos dos obtidos pelo método de ASAKA na 2ª fase de carregamento mas não na 1ª fase;
- (e) Os recalques calculados pelo método convencional são, a menos do método de TAN, maiores que os dos demais métodos; este resultado segue tendência mostrada na bibliografia;

- (f) Os recalques finais calculados com dados até 6 meses são em geral inferiores aos calculados com todos os dados. Este resultado pode ser atribuído à contribuição da compressão secundária na fase mais adiantada da compressão primária, o que acarreta que recalques finais calculados com todos os dados sejam superiores aos calculados com dados de até 6 meses.
- (g) Os recalques por compressão secundária calculados através do método de ASAOKA, admitindo-se aquela ocorrendo após a compressão primária, variam entre 11 a 24 cm, conforme se infere dos resultados mostrados na tabela V.2. Estes valores são em média 17% dos valores de recalques primários.

V.3. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DE COEFICIENTES DE ADENSAMENTO

V.3.1. Valores de c_v e c_h calculados com dados de até 6 meses após o carregamento

Os resultados de coeficientes de adensamento c_v e c_h calculados pelos métodos de ELLSTEIN, ASAOKA e LONG e CAREY com dados de até 6 meses após o carregamento são apresentados na tabela V.3. Alguns pontos importantes a serem ressaltados dessa tabela são:

- (a) os valores de c_v calculados pelos métodos de ELLSTEIN e de ASAOKA situam-se para a 1ª fase de carregamento entre

TABELA V.3 . VALORES DOS COEFICIENTES DE ADENSAMENTO, NAS 1ª E 2ª FASES DE CARREGAMENTO CALCULADOS COM MEDIÇÕES REALIZADAS NO PERÍODO APÓS O TÉRMINO DO CARREGAMENTO ATÉ 6 MESES APÓS O TÉRMINO DO CARREGAMENTO

FASE DE CARREGAMENTO	COEFICIENTE DE ADENSAMENTO (cm ² /s)	SEÇÃO MÉTODO	A	B	C	D	E	F	G
1ª	Vertical $c_v \times 10^{-4}$	ELLSTEIN	43,0	-	-	-	-	-	24,0
		ASAOKA	48,0	-	-	-	-	-	58,6
	Horizontal $c_h \times 10^{-4}$	LONG e CAREY	-	1,4	2,8	6,1	4,4	3,6	-
		ASAOKA	-	4,5	5,8	8,6	5,6	8,6	-
2ª	Vertical $c_v \times 10^{-4}$	ELLSTEIN	-	-	-	-	-	-	52,0 ^[1]
		ASAOKA	-	-	-	-	-	-	29,7
	Horizontal $c_h \times 10^{-4}$	LONG e CAREY	-	6,2 ^[1]	25,0 ^[2]	5,3 ^[1]	6,1 ^[1]	4,3 ^[1]	-
		ASAOKA	-	5,7	7,5	5,7	6,0	6,8	-

NOTAS

[1] Valor médio do período acima descrito.

[2] Valor médio do período acima descrito com inclusão dos valores de coeficientes de adensamento negativos.

$24,0 \times 10^{-4}$ e $58,6 \times 10^{-4}$ cm^2/s (seções A e G) e para a 2ª fase de carregamento entre $52,0 \times 10^{-4}$ e $29,7 \times 10^{-4}$ cm^2/s (seção G); apenas o método de ASAOKA mostrou a esperada diminuição de c_v com o carregamento (ou aumento de pressão efetiva);

- (b) os valores de c_h calculados pelos métodos de LONG e CAREY e ASAOKA variam nas amplas faixa de $1,4 \times 10^{-4}$ a $8,6 \times 10^{-4}$ cm^2/s para a 1ª fase de carregamento e de $4,3 \times 10^{-4}$ a $25,0 \times 10^{-4}$ cm^2/s para a 2ª fase de carregamento, não havendo para c_h uma tendência de diminuição com o carregamento.
- (c) Os valores de c_h calculados pelo método de ASAOKA são maiores que os calculados pelo método de LONG e CAREY na 1ª fase de carregamento;
- (d) Os valores de c_h são bem inferiores aos valores de c_v , o que é contrário ao esperado, conforme será discutido mais detalhadamente adiante quando valores experimentais de laboratório serão apresentados.

V.3.2. Valores de c_v e c_h calculados com todos os dados

Os resultados de c_v e c_h calculados com todos os dados disponíveis são apresentados na tabela V.4. Ressaltam-se os seguintes pontos importantes dessa tabela:

TABELA V. 4 . VALORES DE COEFICIENTES DE ADENSAMENTO NAS 1ª E 2ª FASES DE CARREGAMENTO
CALCULADOS COM TODAS AS MEDIÇÕES REALIZADAS DESDE O TÉRMINO DO CARREGAMENTO

FASE DE CARREGAMEN- TO	COEFICIENTE DE ADENSAMENTO (cm ² /s)	SEÇÃO MÉTODO	A	B	C	D	E	F	G
1ª	Vertical $c_v \times 10^{-4}$	ELLSTEIN	11,0	-	-	-	-	-	8,6
		ASAOKA	47,4	-	-	-	-	-	32,8
	Horizontal $c_h \times 10^{-4}$	LONG e CAREY	-	1,5	1,2	1,8	2,1	2,0	-
		ASAOKA	-	4,1	4,7	6,2	4,1	4,1	-
2ª	Vertical $c_v \times 10^{-4}$	ELLSTEIN	-	-	-	-	-	-	16,0
		ASAOKA	-	-	-	-	-	-	29,7
	Horizontal $c_h \times 10^{-4}$	LONG e CAREY	-	3,7	16,0	3,6	3,3	4,2	-
		ASAOKA	-	4,2	7,5	5,7	6,0	6,8	-

- (a) valores de c_v calculados pelo método de ELLSTEIN bem inferiores aos calculados pelo método de ASAKA, tanto na 1ª como na 2ª fase do carregamento; contrariamente ao esperado observou-se um aumento de c_v da 1ª para a 2ª fase de carregamento; não método de ELLSTEIN.
- (b) valores de c_v e c_h de ELLSTEIN e LONG e CAREY menores do que os calculados com dados de até 6 meses (tabela V.3) o que é coerente com a tendência de diminuição de c_v e c_h com o aumento do tempo de observação conforme discutido no final do capítulo IV.
- (c) valores de c_v e c_h de ASAKA para a 1ª fase de carregamento menores que os calculados com dados até 6 meses; entre tanto para a 2ª fase de carregamento os valores de 6 meses e de todos os dados são iguais visto que para este último caso utilizaram-se poucas medições adicionais com mais de 6 meses, o que não alterou o valor de β_1 do método de ASAKA.

V.3.3. Curvas de grau de adensamento - tempo, teóricas e medidas

Outra forma de se avaliar os valores de coeficientes de adensamento de campo é através da comparação entre curvas teóricas e medidas de grau de adensamento versus tempo.

As curvas teóricas aqui apresentadas foram calculadas com base em valores de c_v e c_h que tornavam aquelas curvas mais aproximadas das medidas. Para cada valor de c_v ou c_h e tempo t fo

ram calculados valores de fator tempo T_v ou T_h através das equações (III.3.5) e (III.4.12) e então calculados valores de grau de adensamento U_v ou U_h através das eqs. (III.3.13) e (III.4.16) conforme se tratasse de adensamento vertical ou horizontal. Por simplicidade não foi considerado o efeito do "smear" nos cálculos acima e o dreno foi admitido como infinitamente permeável. Foi aplicado o procedimento de TERZAGHI-GILBOY para a correção do efeito de carga variável com o tempo.

As curvas medidas foram obtidas dividindo-se o recalque medido s_t no tempo t pelo recalque final de s_f calculado pelo método de ASAOKA. Optou-se por utilizar os valores de s_f calculados com todos os dados (tabela V.2) visto que estes são aparentemente mais realistas que os de 6 meses (tabela V.1) conforme discussão anterior.

As curvas obtidas conforme explicação acima são apresentadas nas figuras V.1 a V.3 para a 1ª fase de adensamento e nas figuras V.4 e V.5 para a 2ª fase de carregamento. Observa-se desses resultados que as curvas medidas estão associadas a valores de c_v ou c_h mais altos inicialmente e a menores valores de c_v ou c_h com o aumento do tempo. A tabela V.5 apresenta as faixas de valores de c_v e c_h de cada seção transversal para a 1ª e 2ª fases de carregamento. A comparação desses valores de c_v e c_h com outros valores obtidos nessa dissertação será realizada adiante.

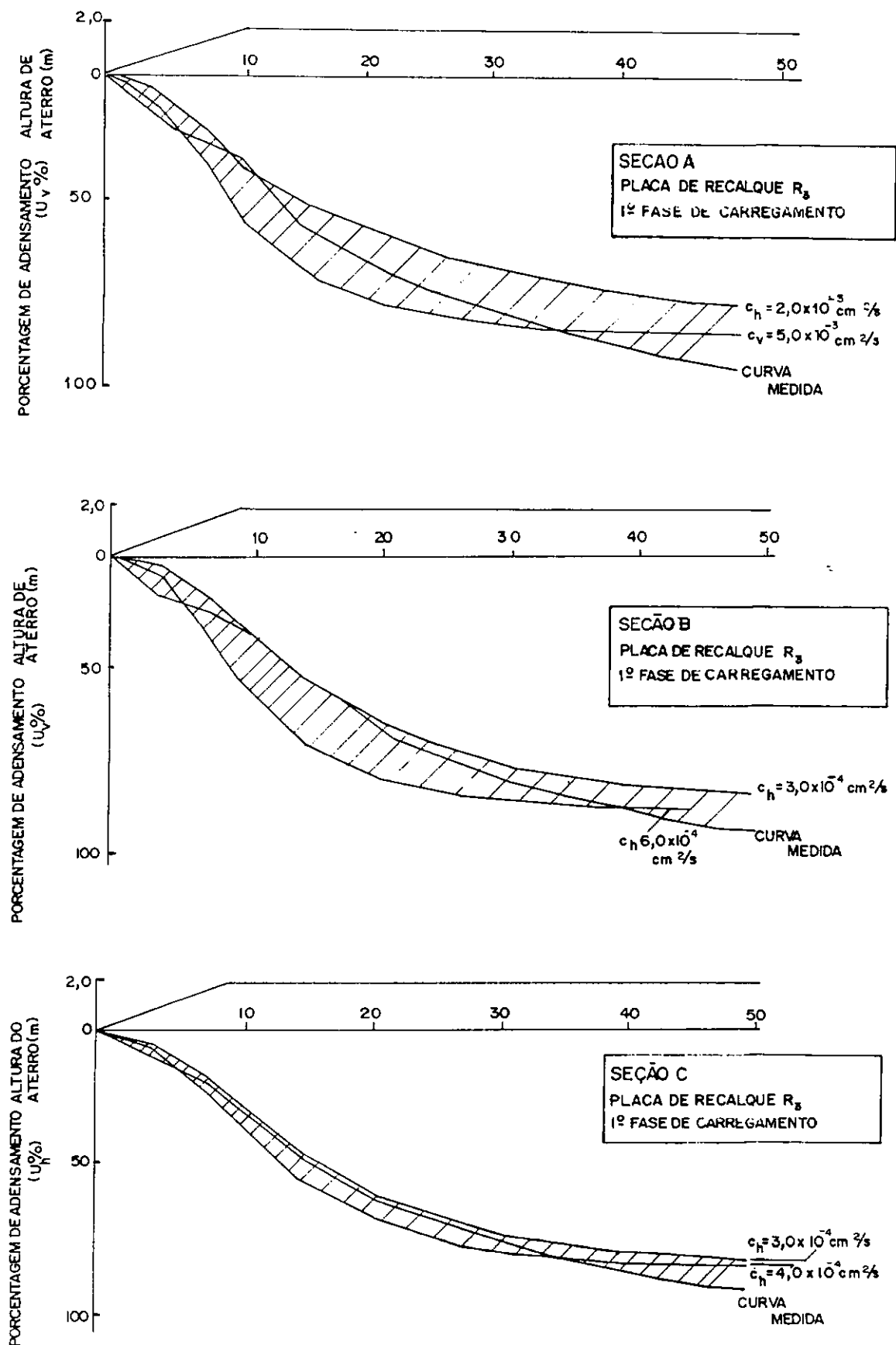
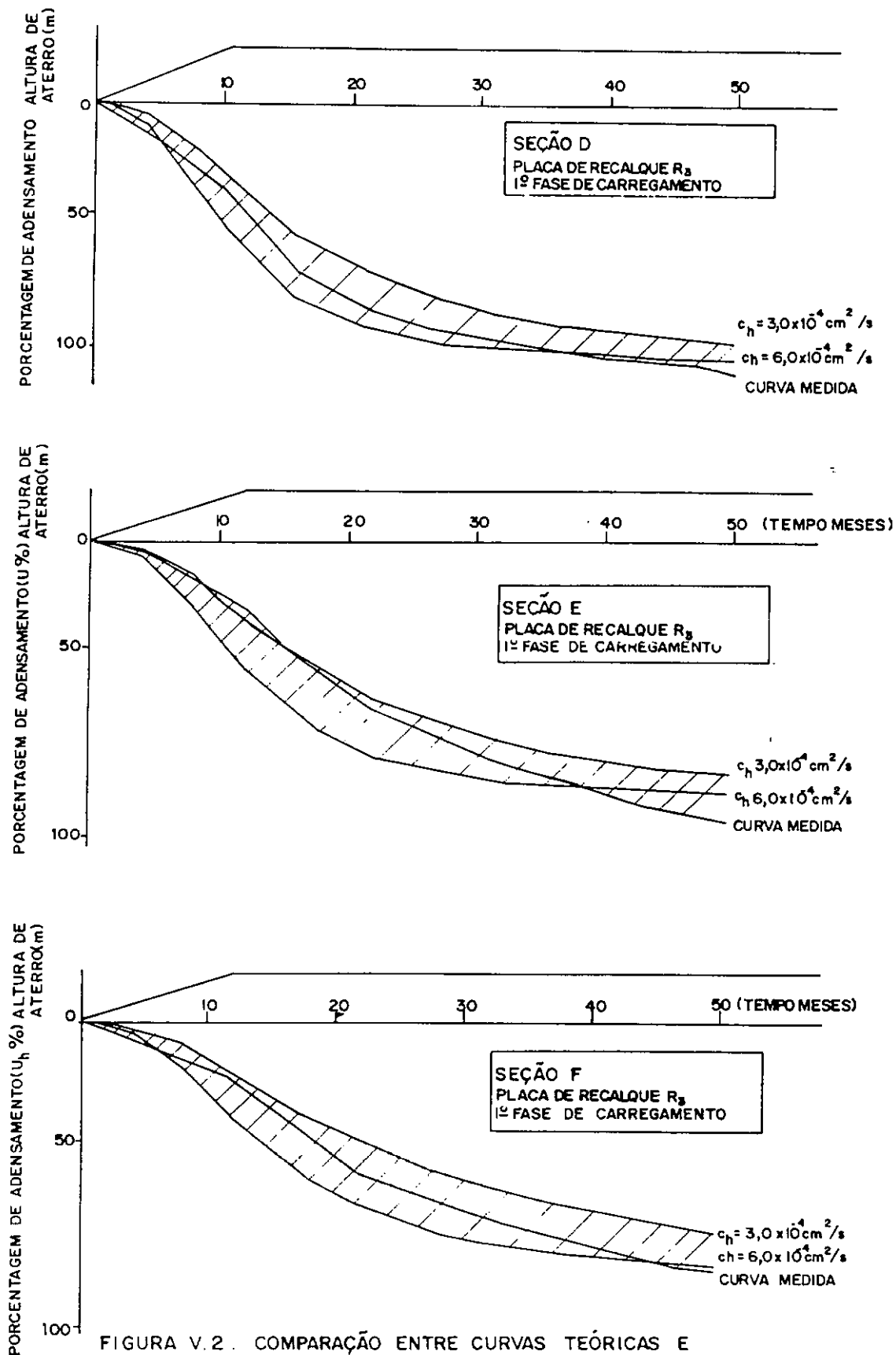


FIGURA V. 1 COMPARAÇÃO ENTRE CURVAS TEÓRICAS E MEDIDA DE GRAU DE ADENSAMENTO



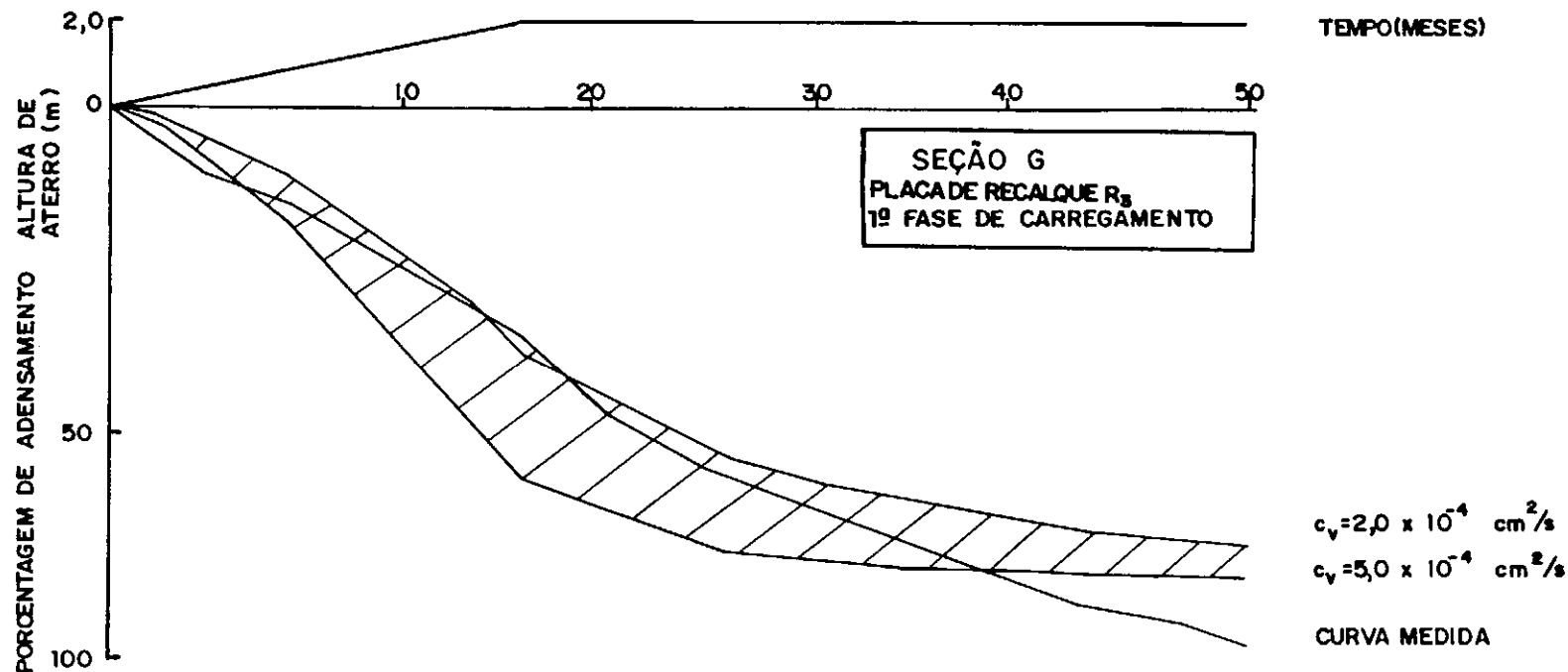


FIGURA V.3. COMPARAÇÃO ENTRE CURVAS TEÓRICAS E MEDIDAS DE GRAU DE ADENSAMENTO

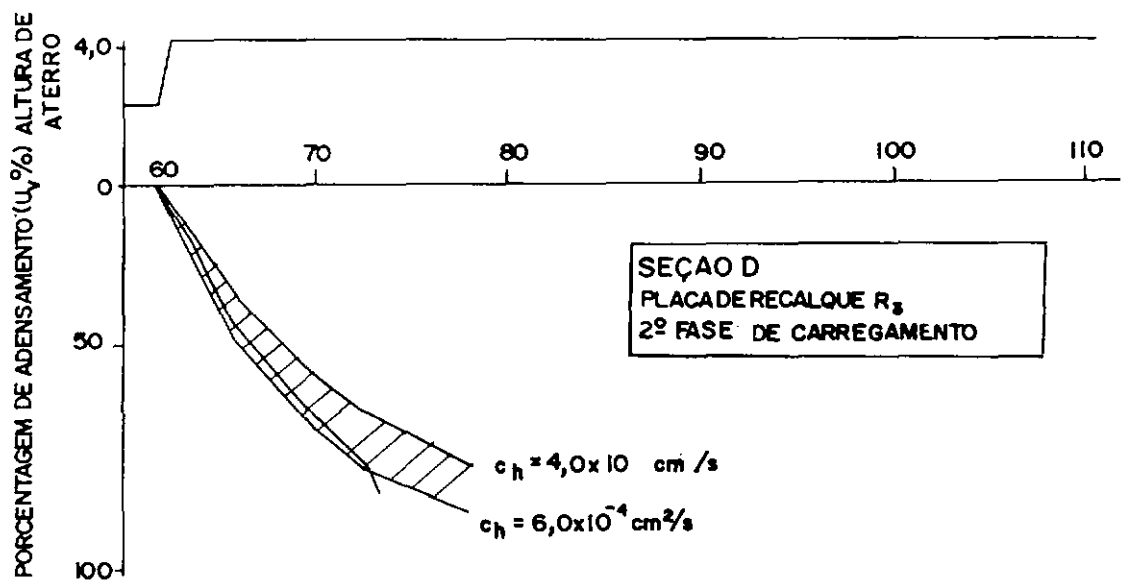
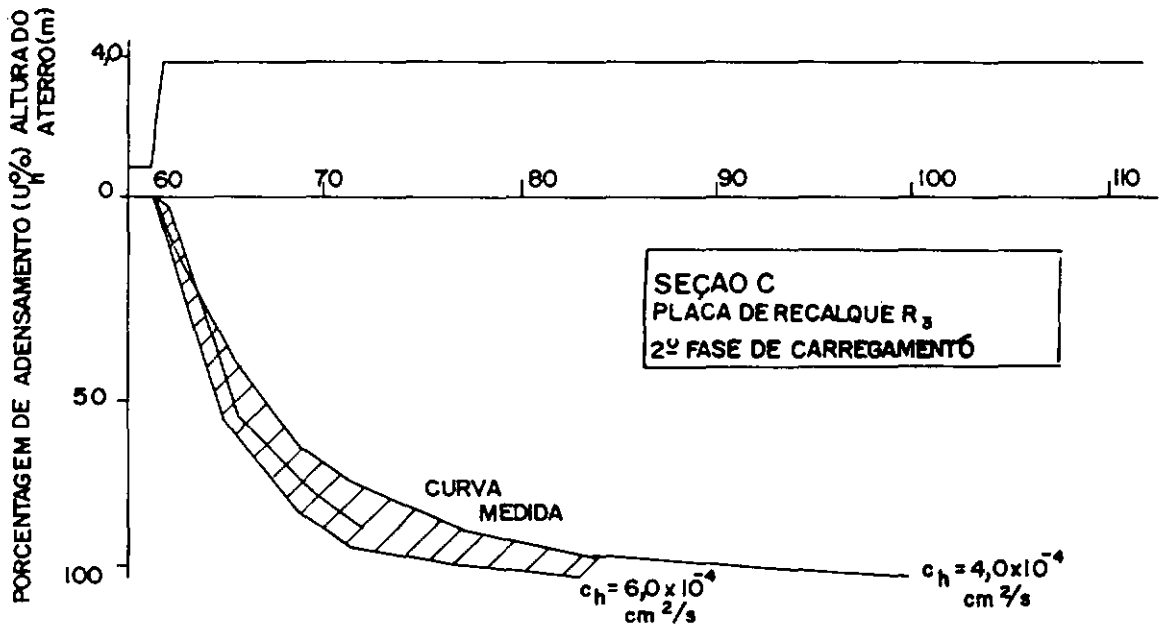
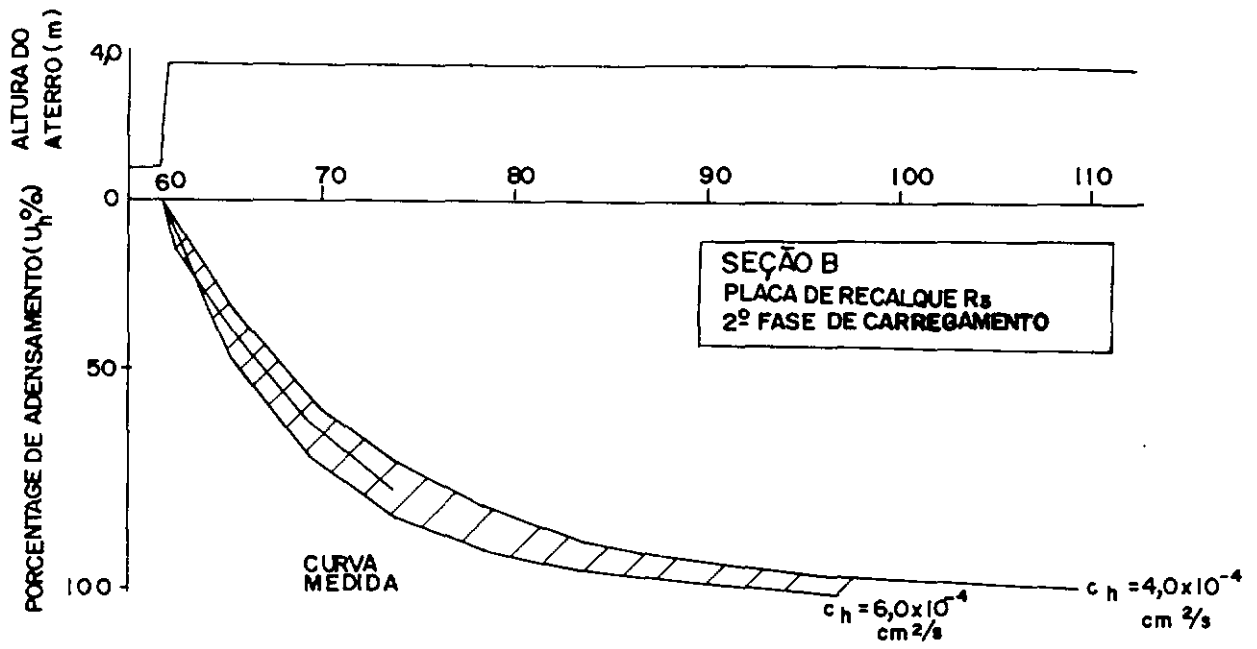


Figura V. 4 - Comparação entre curvas teóricas e medidas de grau de adensamento

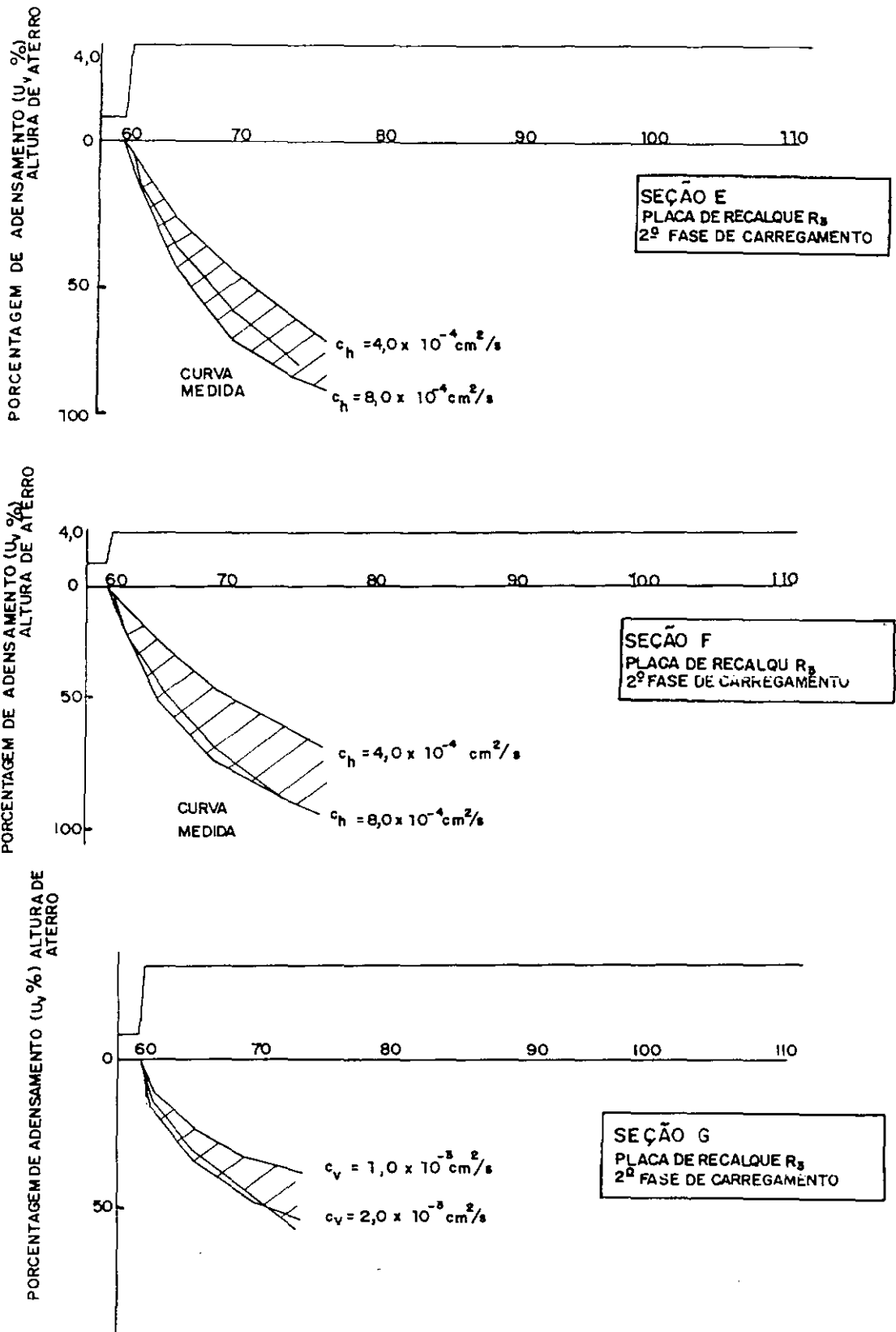


FIGURA V.5. COMPARAÇÃO ENTRE CURVAS TEÓRICAS E MEDIDAS DE GRAU DE ADENSAMENTO

TABELA V.5. FAIXA DE VARIAÇÃO DOS VALORES DE COEFICIENTES DE ADENSAMENTO OBTIDOS PELAS CURVAS DE GRAU DE ADENSAMENTO - TEMPO.

SEÇÃO	FAIXA DE VALORES DE c_v E $c_h \cdot 10^{-4}$ (cm ² /s) OBTIDOS PELAS CURVAS DE GRAU DE ADENSAMENTO - TEMPO					
	1ª FASE DE CARREGAMENTO			2ª FASE DE CARREGAMENTO		
A	20	—	50	—		
B	3,0	—	6,0	4,0	—	6,0
C	3,0	—	4,0	6,0	—	10,0
D	3,0	—	6,0	4,0	—	6,0
E	3,0	—	6,0	4,0	—	8,0
F	3,0	—	6,0	4,0	—	8,0
G	20	—	50	10	—	20,0

V.3.3.1. Discussão das curvas de grau de adensamento medidas

Comparando-se as curvas de grau de adensamento medidas observa-se na 1ª fase de carregamento que 80% dos recalques com drenos ocorreu, na maioria das seções com drenos, para tempos de adensamento próximos a 800 dias (2,2 anos).

Cálculos realizados na ocasião do projeto do aterro e relatados por COLLET^[10] são apresentados na tabela V.6. Observa-se que para $U_h = 80\%$ e tomando-se por exemplo $c_h = 2 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ e um fator de amolgamento S (RICHART^[38]) igual a 1,2 obtém-se um tempo de dissipação igual a 2,6 anos o que é bastante próximo do obtido acima, o que indica que valores de c_h são um pouco superiores a $2 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ e portanto consistentes com os obtidos pelo método de ASAKA.

Por outro lado para a 1ª fase de carregamento os cálculos na ocasião do projeto (COLLET^[10]) para as seções sem drenos indicavam para $U = 80\%$ um tempo de adensamento correspondente de 45 anos para $c_v = 5 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$. Este resultado contraria totalmente observações de campo que dão $t_{80} = 800$ dias para ambas as seções A e G, indicando que valores de c_v de campo foram superiores aos considerados nos cálculos de projeto, o que é o usual (MAGNAN e outros^[31]).

Outros aspectos evidentes das curvas de grau de adensamento medidas são os altos valores de compressão secundária observadas na 1ª fase de adensamento em todas as seções, conforme já discutido no item V.2.

Com relação as curvas referentes à 2ª fase de carregamento mostradas nas figuras V.4 a V.5, observa-se que todas as seções com drenos apresentaram no final das observações graus de adensamento superiores a 75%. A seção G sem drenos no entanto apresentou U_v maior que 60% no final das observações.

V.3.4. Comparação com valores obtidos através de ensaios de laboratório

Os resultados de c_v e c_h obtidos neste trabalho serão aqui comparados com os valores obtidos através de ensaios de adensamento especiais de laboratório.

Os ensaios de adensamento especiais de laboratório realizados por COUTINHO^[13] (também relatados por COUTINHO e LACEIDA^[14]), para a determinação de c_h consistiram de ensaios de tipos radial externo e radial interno, além de ensaios convencionais em amostras moldadas perpendicularmente à direção vertical do depósito, ou seja em amostras moldadas retiradas horizontalmente.

Foram também realizados ensaios de adensamento convencionais para a determinação de c_v . Os resultados desses ensaios, descritos em detalhe nas referências acima, foram apresentados na Figura II.3, que apresenta curvas médias de variações de c_v e c_h com a pressão efetiva vertical para amostras retiradas entre as profundidades 5,5 e 7,0m. Os valores de c_h da figura II.3 foram baseados exclusivamente nos ensaios de adensamento radial externo, os quais foram considerados os mais satis

fatórios, o que não foi o caso dos ensaios com drenagem interna devido ao fluxo "parasita" extremo observado nos mesmos. Os ensaios em amostras moldadas horizontalmente também não foram incluídos presumivelmente por terem um sentido de carregamento diverso do de campo, ainda que o sentido de drenagem seja o de campo no caso de utilização de drenos verticais.

Atualmente entretanto, acredita-se que ensaios com drenagem radial externa que utilizem drenos rígidos, o que foi o caso de COUTINHO [13], sejam muito influenciados por "smear" do solo com o dreno, conforme demonstraram estudos recentes de TRANTWEIN e outros [47].

Em uma nova interpretação desses ensaios realizada recentemente (SILLS, ALMEIDA e DANZIGER [42]), resolveu-se incluir os resultados de todos os tipos de ensaios realizados tendo em vista os problemas inerentes a cada um deles. Com essa massa de dados maior torna-se difícil e menos razoável tirar valores médios das variações de c_h e c_v , razão pela qual resolveu-se apresentar todos os resultados conforme mostrado na figura V.8.

Para a faixa de pressões relevantes ao carregamento aplicado no campo valores de c_v e c_h variam entre 5×10^{-4} a 280×10^{-4} cm²/s para a 1ª fase de carregamento e entre 3×10^{-4} a 90×10^{-4} cm²/s para a 2ª fase de carregamento.

V.3.5. Comparação com valores obtidos através de ensaios "in situ" do tipo piezocone

Os valores de coeficientes de adensamento obtidos neste trabalho, são aqui comparados com valores de coeficientes de adensamento obtidos através de ensaios de dissipação "in situ" com piezocone descritos em detalhe por SILLS, ALMEIDA e DANZIGER [42] .

Utilizou-se nesses ensaios um piezocone Fugro de 5 cm² de seção transversal e de propriedade da Universidade de Oxford. Este piezocone tem 4 transdutores de poro pressão, sendo um no meio da face do cone e os outros três ao longo da luva de atrito. Valores de c_h calculados através de ensaios de dissipação de poro pressão realizados em várias profundidades são apresentados na tabela V.7.

Como se observa pela tabela V.7 os valores de c_h obtidos variam entre 120×10^{-4} a 290×10^{-4} cm²/s para medidas na face do cone e de 90×10^{-4} a 252×10^{-4} cm²/s para as medidas efetuadas no primeiro transdutor da luva de atrito.

Os valores mais altos de 252×10^{-4} e de 290×10^{-4} cm²/s referem-se ao único ensaio realizado na profundidade próxima a 6,0 m. Para os outros ensaios realizados em profundidades próximas a 2, 4 e 6 m os valores de c_h variam entre as faixas mais estreitas de 120×10^{-4} a 195×10^{-4} cm²/s para medidas na face do cone e de 90×10^{-4} a 150×10^{-4} cm²/s para medidas na luva de atrito.

TABELA V.6. INTERVALOS DE TEMPO PARA OCORRÊNCIA DE 80% DE RECALQUE DO ATERRO EXPERIMENTAL II UTILIZANDO-SE DRENOS DE AREIA - APUD COLLET [11]

ESPAÇAMENTO (m)	TEMPO DE DISSIPAÇÃO DO EXCESSO DE PORO-PRESSÃO (ANO)		
	$U_h = 80\%$		
	FATOR DE AMOLGAMENTO (s)		
2,5	1,0	1,2	1,5
	0,5 - 2,5	0,5 - 2,6	0,6 - 3,2

TABELA V.7. VALORES DE c_h OBTIDOS PELO "METODO log t" APUD SILLS e OUTROS [42]

T E S T E nº	PROFUNDIDADE (m)	c_h ($\times 10^{-4}$ cm ² /s) da face do cone	c_h ($\times 10^{-4}$ cm ² /s) primeiro transdu- tor da luva de a- trito
2	4,39	120	98
2	8,38	195	94
3	4,22	167	152
3	8,22	132	92
4	2,38	175	152
4	6,38	290	252
4	8,38	145	90

V.3.6. Comparação com o valor de c_v obtido através de ensaios in situ

O valor de c_v in situ pode também ser calculado em função do coeficiente de permeabilidade "in situ" k e do módulo de compressibilidade volumétrica m_v obtido através de ensaios de laboratório utilizando-se a equação

$$c_v = \frac{k}{m_v \cdot \gamma_w} \quad (V.1)$$

Valores de k obtidos através de ensaios de permeabilidade in situ (Werneck e outros, 1977) realizados em piezômetros instalados na área experimental de Sarapuí variaram de 1,4 a 3,3 x 10⁻⁹ m/s, sendo adotado o valor médio de 2,4 x 10⁻⁹ m/s. Por outro lado, o valor representativo de m_v obtido para a faixa de pressões in situ através dos ensaios de adensamento de COUTINHO (1976) é de 0,0012 m²/kN. utilizando-se esses valores na equação V.1 obtém-se

$$c_v = 20 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}.$$

V.3.7. Avaliação final dos valores de c_v e c_h

Apresenta-se na tabela V.8 um sumário dos valores de c_v e c_h obtidos através das análises de recalques de campo, de ensaios de laboratório e de ensaios "in situ". São dois os valores de análises de recalques apresentados: os calculados pelo método de ASAKA com todos os dados, por acreditar-se que esses valores são os "melhores" obtidos aqui quando comparados aos dos outros métodos e os obtidos comparando-se as curvas de grau de adensamento teóricas e medidas.

As faixas de valores de ensaios de laboratório indicadas foram obtidas da figura V.6 para as gamas de pressões de cada fase de carregamento. Entretanto para esses níveis de pressões as variações de c_v e c_h são muito amplas para permitir uma diferenciação entre valores de c_v e c_h , conforme observado, no item V.3.3.

As faixas de resultados de todos os procedimentos acima são apresentados na tabela V.8. Como era esperado é boa a concordância entre os valores dos dois tipos de análise de recalques apresentados, o que reforça a relevância do método de ASAKA por ser mais simples que o método de curvas de grau de adensamento-tempo.

Comparando-se o método de análise de recalques com os outros dois observa-se na tabela V.8 que a concordância entre valores de c_v e c_h obtidos pelos diversos procedimentos é apenas razoável, tendo em vista as amplas faixas de valores obti

TABELA V.8. VALORES DE COEFICIENTES DE ADENSAMENTO c_v e c_h ($\times 10^{-4}$ cm²/s)

FASE DE CARREGAMENTO DO ATERRO	COEFICIENTE DE ADENSAMENTO	ANÁLISE DE RECALQUES		ENSAIOS DE LABORATÓRIO (5,5 a 7,5 m)	ENSAIOS "IN SITU"	
		(MÉTODO DE ASAOKA)	CURVAS DE GRAU DE ADENSAMENTO VERSUS TEMPO		PIEZOCONE (2,38 a 8,38m)	PERMEABILIDADE
DEPÓSITO NÃO CARREGADO (h=0 m)	c_h	-	-	-	90 a 290	-
	c_v	-	-	-	-	20,0
1ª FASE (h= 2,0m)	c_v	32,8 a 47,4	20,0 - 50,0	5 a 280 [1]	-	
	c_h	4,1 a 6,2	3,0 - 6,0			
2ª FASE (h=3,7m)	c_v	29,7	10,0 - 20,0	3 a 90 [1]	-	
	c_h	4,2 a 7,5	4,0 - 10,0			

NOTAS:

[1] Faixas de valores muito ampla para permitir uma diferenciação entre c_v e c_h

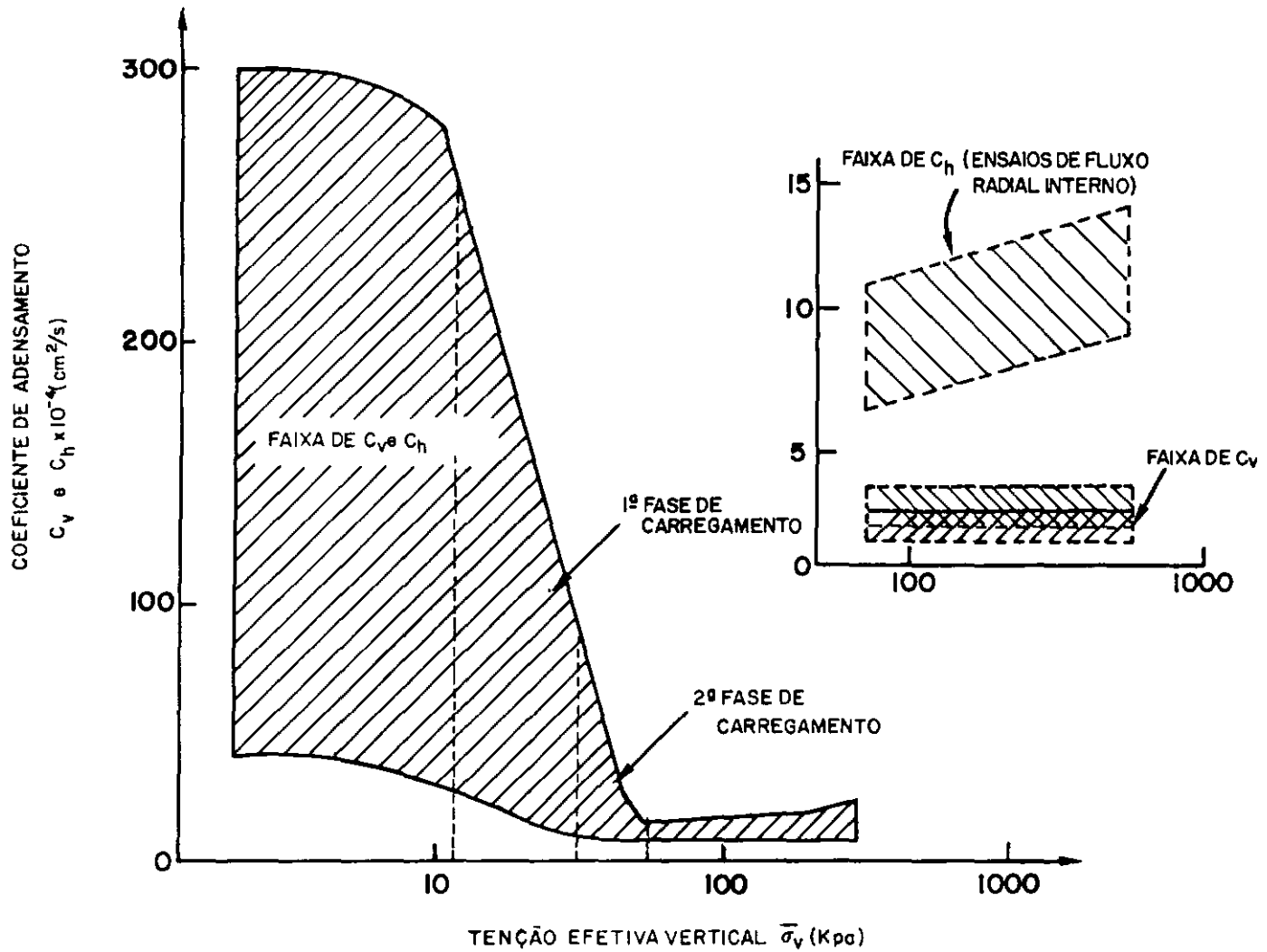


Figura V.6 - Faixa de valores obtidos de c_v e c_h em ensaios de laboratório

dos, principalmente nos casos de ensaios "in situ" e de laboratório. Observa-se entretanto certa coerência entre os valores dos ensaios "in situ" e os dos ensaios de laboratório para níveis de pressões correspondentes à 1ª fase de carregamento.

Observa-se também da tabela V.8. que as faixas dos valores de c_h aqui obtidos estão em geral próximo do limite inferior dos ensaios de laboratório. A mesma observação entretanto não é válida para valores de c_v . As constatações acima já dão indicações da eficiência dos drenos, tópico esse a ser brevemente discutido abaixo.

Por fim seria bom ressaltar que não era esperada uma concordância muito boa entre valores de coeficientes de adensamento dos três procedimentos apresentados na tabela V.8 tendo em vista as diferenças marcantes em termos de escala, de condições de contorno e de drenagem dos referidos procedimentos.

V.4. COMPARAÇÃO DE RECALQUES PREVISTOS COM DADOS DE ATÉ 6 MESES (MÉTODO DE ASAOKA) COM RECALQUES MEDIDOS

Como os resultados anteriores sugerem que o método de ASAOKA é o mais indicado para aplicações práticas, uma avaliação final deste será aqui realizada. Assim, serão comparadas curvas de recalques previstas pelo método de ASAOKA utilizando dados de até 6 meses (tabelas V.1 e V.3) com curvas de recalques medidas.

O procedimento adotado para o cálculo pelo método de ASAKA das curvas de recalques medidas foi:

- (a) cálculo, para cada valor de t do fator tempo, T_v ou T_h utilizando-se os valores de c_v e c_h da tabela (V.3);
- (b) cálculo, para cada valor de t , do grau de adensamento U_v ou U_h e cálculo do recalque s_t a partir do valor de s_f de cada seção (tabela (V.1));
- (c) traçado da curva $s_t \times t$ e correção do efeito de carregamento variável com o tempo utilizando-se para tal o procedimento de TERZAGHI-GILBOY.

As curvas recalque-tempo assim calculadas, para a 1ª fase do carregamento, são apresentadas nas figuras V.7 à V.9, onde são comparadas com as curvas medidas. Observa-se que existe boa concordância entre curvas calculadas e medidas para tempos até o período entre 20 e 30 meses, dependendo da seção transversal. Esta faixa de tempo é apenas um pouco superior ao período de 6 meses após o carregamento, sendo portanto, tal concordância totalmente esperada visto que os parâmetros foram obtidos para esta faixa de tempo. Neste período, grande parte do recalque primário já havia ocorrido passando então a predominar o recalque por compressão secundária, sendo esta a razão da discordância entre as duas curvas, para tempos maiores.

A consideração de recalques por compressão secundária obviamente melhoraria a concordância entre as curvas calculadas e medidas. Entretanto, a consideração secundária está fo

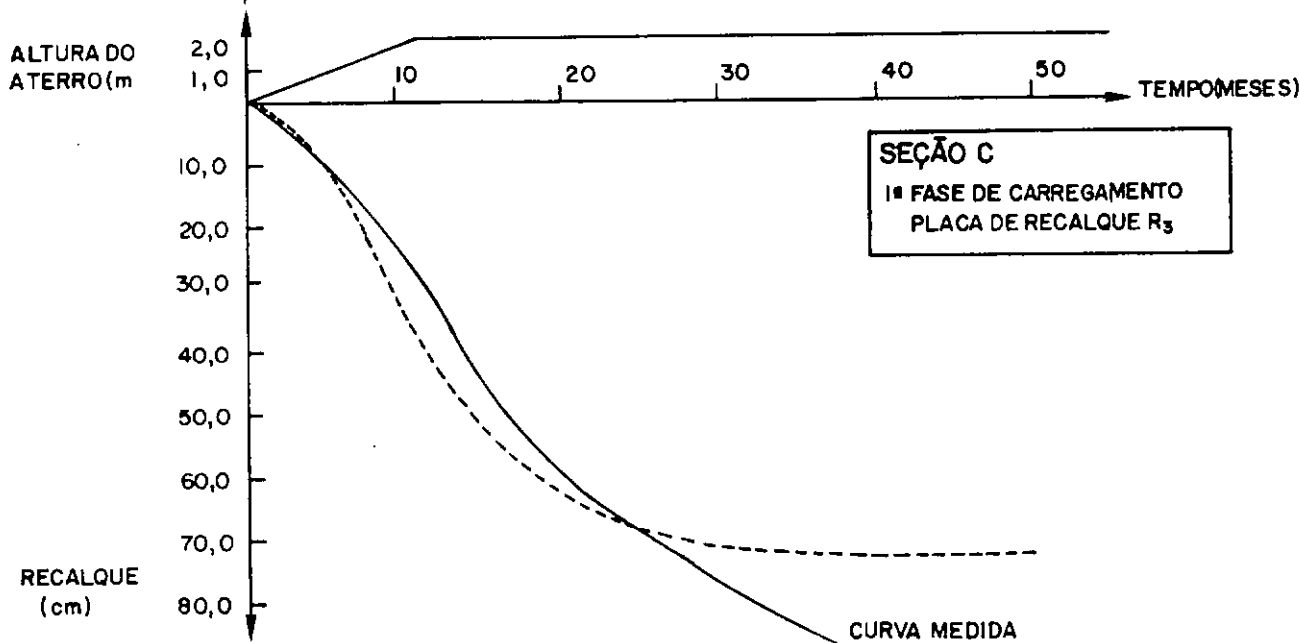
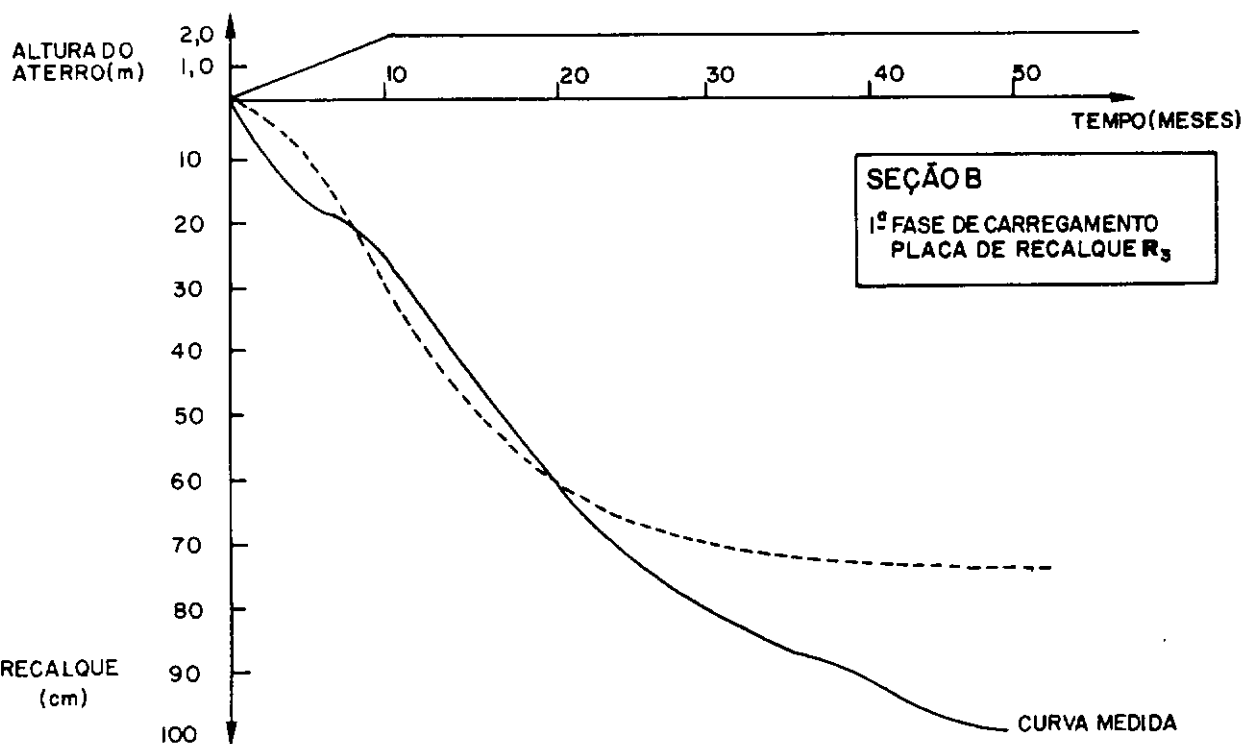
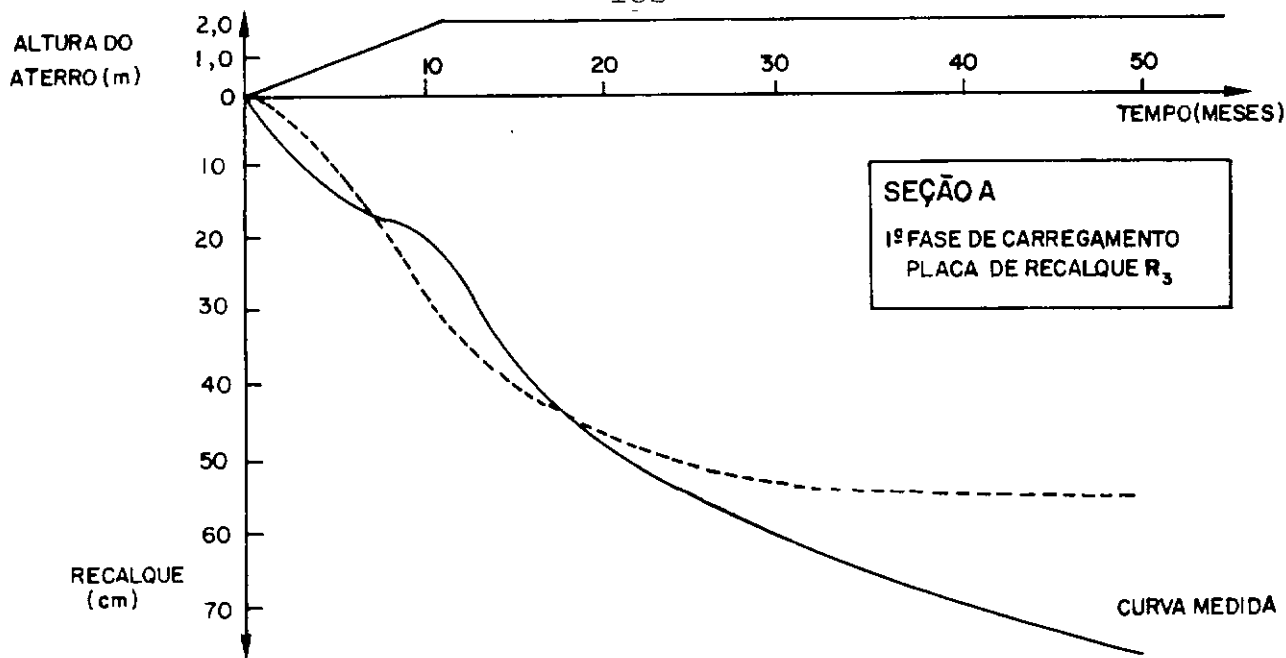


Figura V.7 - Curvas de recalques medidos e calculados.

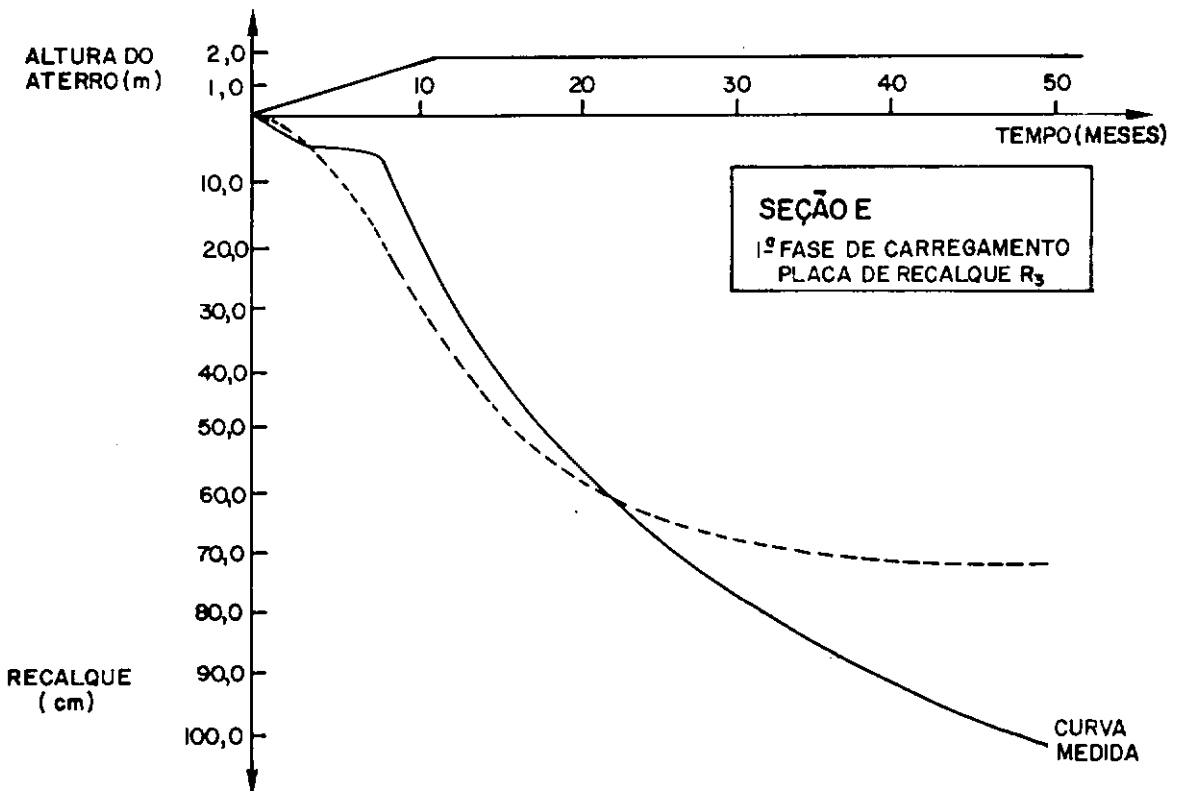
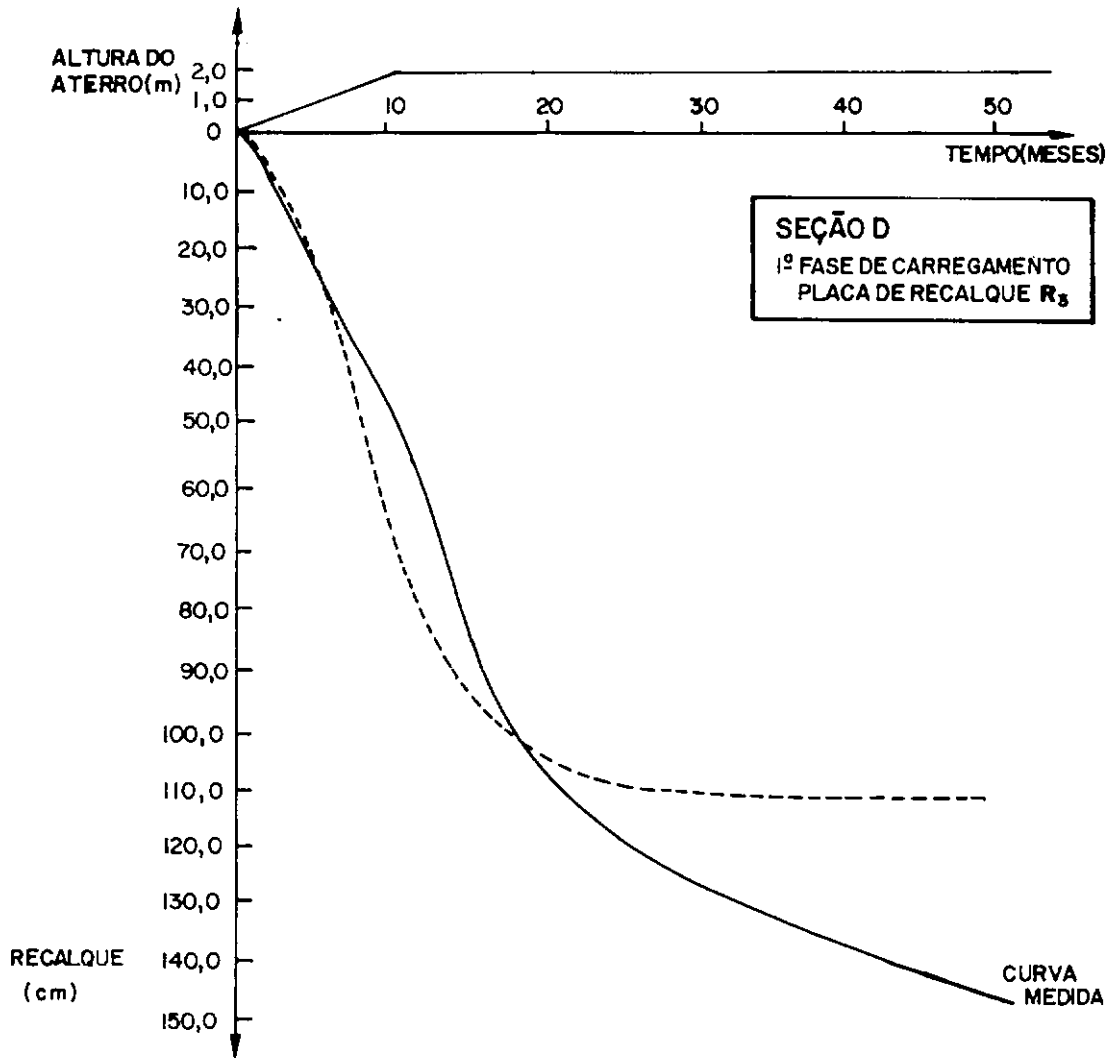


Figura V. 8 Curvas de recalques medidos e calculados

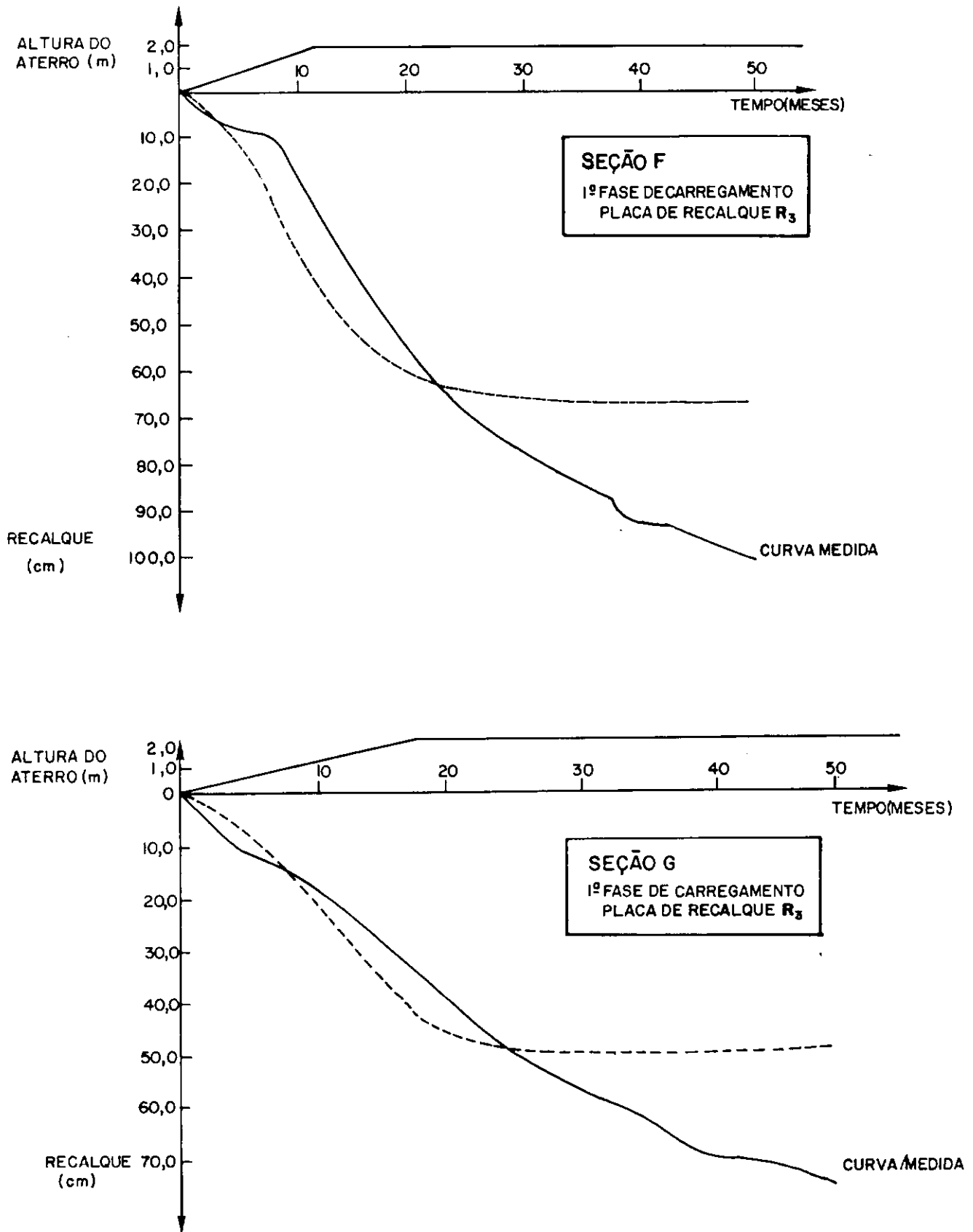


Figura V. 9 - Curvas de recalque medidos e calculados.

ra do escopo deste trabalho. A utilização de valores de c_v , c_h e s_f obtidos pelo método de ASAKA com todos os dados ao invés de dados até 6 meses também melhoraria a concordância entre as duas curvas. Porém tal comparação é de menos importância prática por razões óbvias.

As curvas medidas e calculadas de recalque-tempo para a 2ª fase de carregamento são apresentadas nas figuras V. 10 a V. 11. A menos das seções B e G a concordância entre as duas curvas é muito boa e superior à da 1ª fase de carregamento. As razões para a melhor concordância são o carregamento instantâneo e o menor período de observações. Espera-se, analogamente à 1ª fase de carregamento, que as curvas se afastem entre si com o aumento do tempo devido à contribuição da compressão secundária.

V.5. AVALIAÇÃO PRELIMINAR DA EFICIÊNCIA DOS DRENOS

A avaliação preliminar da eficiência dos drenos será aqui apresentada baseando-se exclusivamente na presente análise de recalques. Considera-se essa avaliação preliminar pois a mesma não levará em conta outros dados como os de poro-pressão e de variação da resistência não drenada com o tempo, por exemplo.

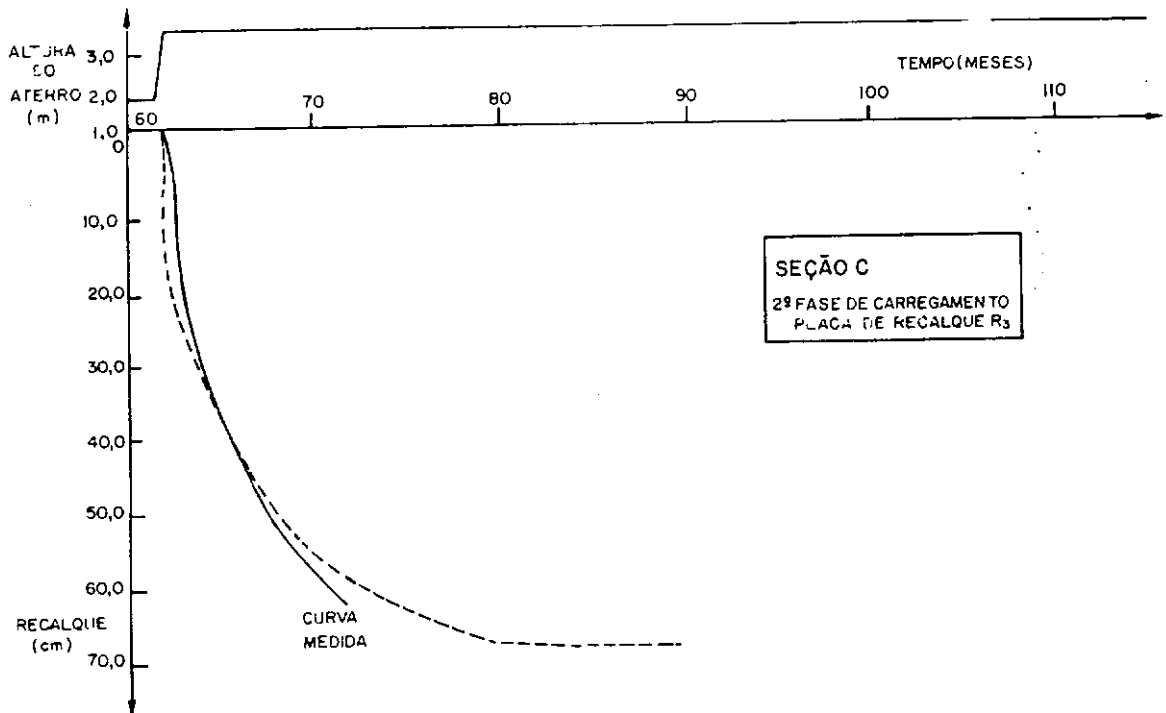
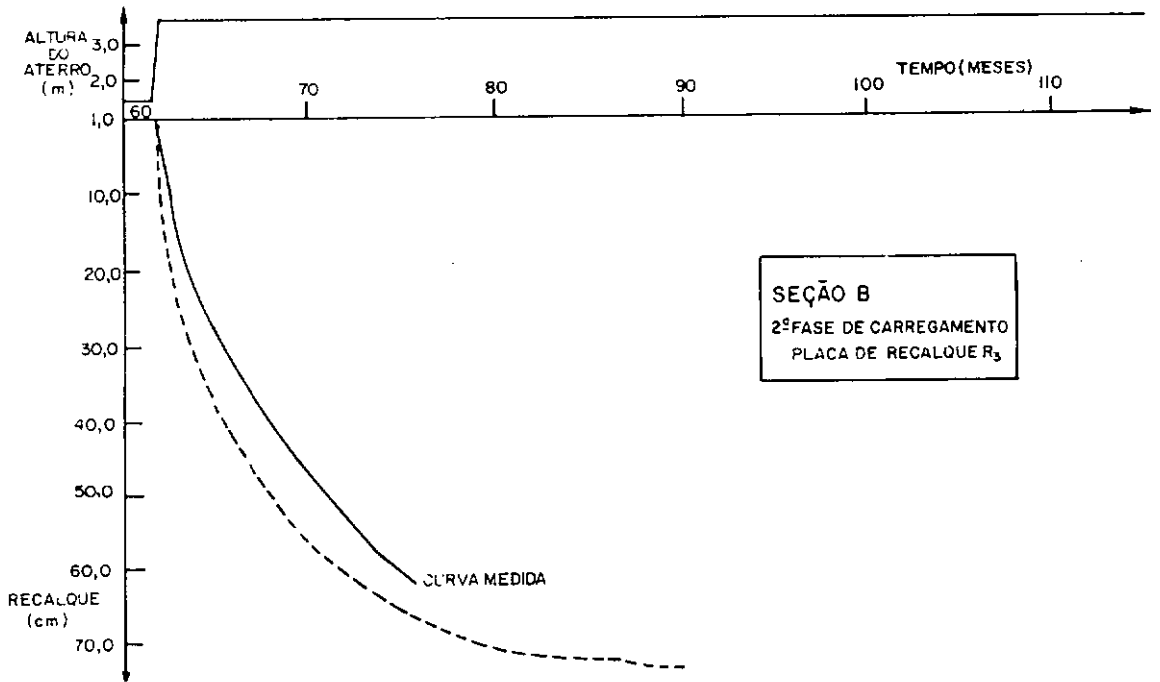


Figura V.10 - Curvas de recalques medidos e calculados.

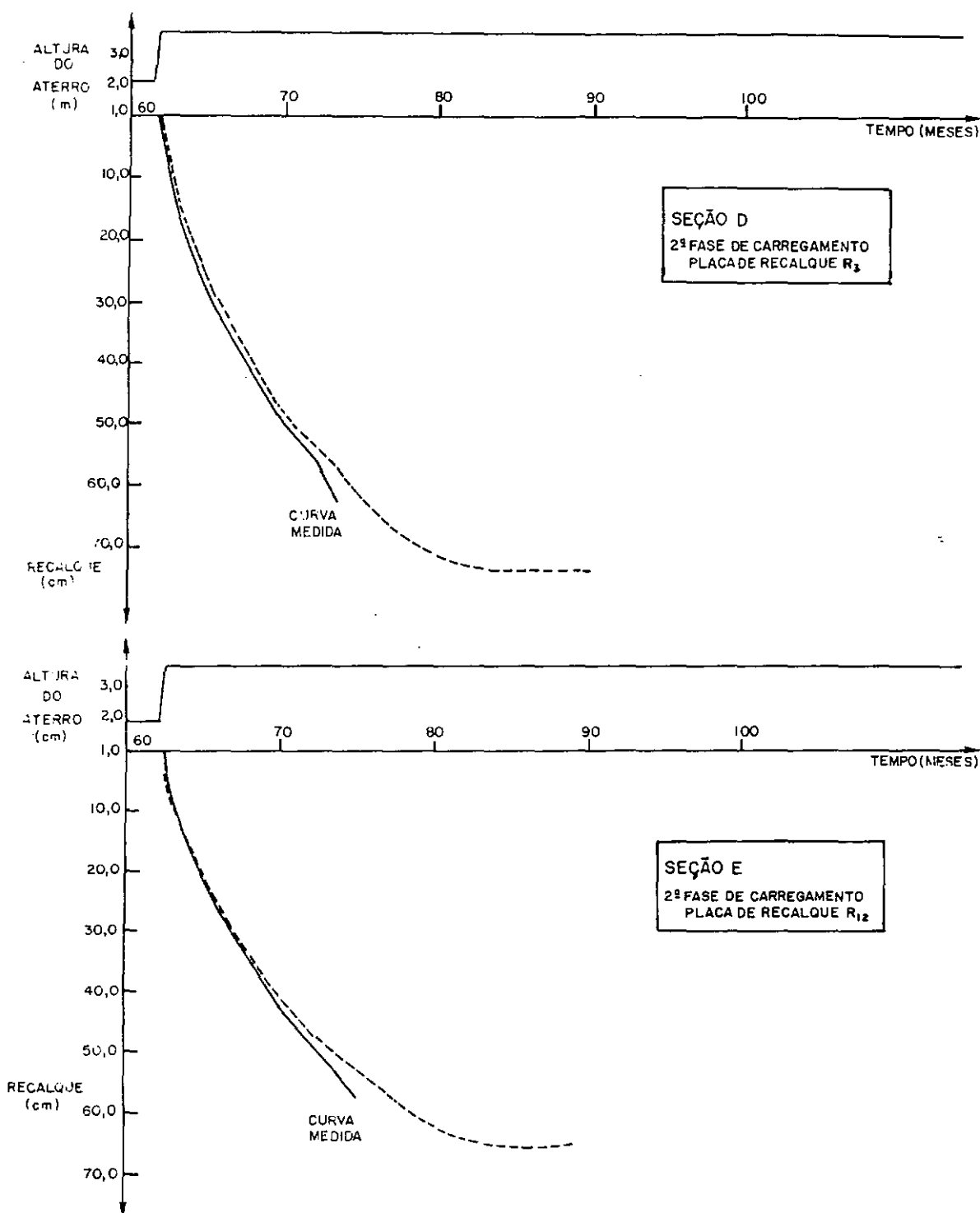


Figura V.11 - Curvas de recalques medidos e calculados

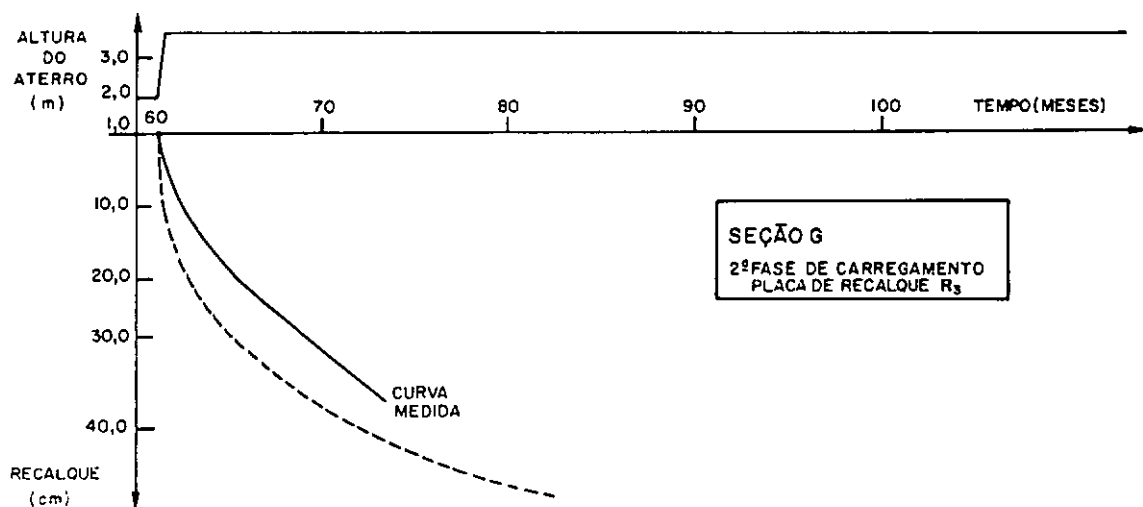
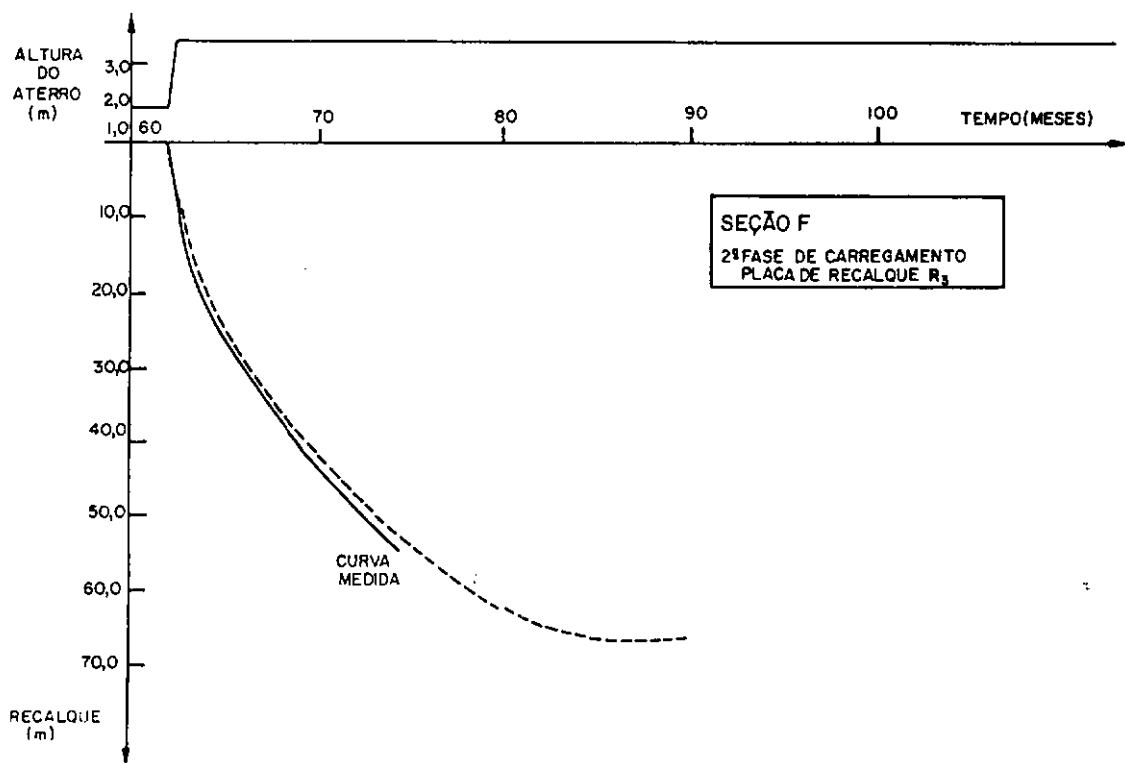


Figura V.12 - Curvas de recalques medidas e calculados

V.5.1. Fatores que influenciam na eficiência dos drenos

É virtualmente impossível a colocação de drenos de areia sem induzir alguma perturbação no solo. Ainda que essa perturbação possa ser mínima ou quase desprezível em condições controladas de laboratório (ALMEIDA e outros,^[3]), em campo essas perturbações são magnificadas devido principalmente à escala os trabalhos e equipamentos pesados utilizados.

Uma das principais consequências dos efeitos perturbadores relacionados à execução dos drenos, é a geração de altos valores de poro - pressão em alguns métodos de execução de drenos, o que é com certeza o caso do método de ponta fechada.

No que diz respeito à durabilidade dos drenos de areia as duas possibilidades seguintes podem ocorrer (JOHNSON ^[25]): a colmatação do dreno por partículas finas provenientes do solo no entorno do dreno e a rutptura da continuidade do dreno devido à deformações verticais ou horizontais excessivas. De forma análoga as duas possibilidades acima podem afetar os drenos pré-fabricados, além de aspectos ligados à durabilidade do material no caso de drenos de cartão ou de papel.

V.5.2. Possível amolgamento causado pela execução dos drenos

O possível efeito do amolgamento causado pela instalação dos drenos pode ser inferido através dos valores dos coe

ficientes de adensamento das seções com e sem drenos. Isto ocorre porque o c_v de amostras de boa qualidade é sempre maior do que o c_v de amostras amolgadas, conforme indicaram estudos de COUTINHO [13] que obteve relações entre os valores de c_v acima variando entre 1 e 2 no ramo normalmente adensado da argila de Sarapuí. Estes resultados confirmaram estudos anteriores (MORAN e outros [34] e JOHNSON [25]) que obtiveram valores daquela relação de c_v variando entre 1 a 6 com um valor médio de 3,5.

Do resumo dos resultados de c_v e c_h da análise de recalques mostrados na tabela V.8 observa-se que a relação entre o valor médio de c_v das seções sem drenos para o valor médio de c_h das seções com drenos é da ordem de 6. Partindo-se da hipótese que a relação $c_h/c_v = 2$ de laboratório mantém-se em campo, chega-se à conclusão que a relação entre valores de c_v da região sem dreno para a região com drenos (ou a relação entre c_v do solo indeformado para o c_v do solo amolgado) é da ordem de 12. Admitindo-se por outro lado que a cravação dos drenos e o "smear" resultante abaixe drasticamente a relação c_h/c_v para 0,5, chega-se à conclusão que $c_v(\text{ind})/c_v(\text{am}) = 3$. Assim, com base nas hipóteses acima conclui-se que um amolgamento considerável foi causado pela instalação dos drenos aliados possivelmente a efeitos adicionais de colmatação e "smear".

V.5.3. Velocidades de recalque das Seções do Aterro II

Um objetivo importante da utilização de drenos verticais é a aceleração de recalques. Portanto quanto maior a ve

locidade de recalques mais eficiente será o dreno e quanto menor a velocidade menor a eficiência.

As velocidades de recalques das diversas seções estão apresentadas nas figuras V.13 e V.14 respectivamente para a 1ª e 2ª fase de carregamento. Observa-se, nestas figuras, as velocidades de recalques crescentes durante os períodos de carregamento do aterro, entretanto, as mesmas não serão analisadas. Para a 1ª fase de carregamento, figura V.13 observa-se que as seções E e F com drenos pré-fabricados são as que apresentam consistentemente as maiores velocidades de recalque; a seção D com dreno jateado apresenta inicialmente uma velocidade alta e a seguir essa velocidade baixa substancialmente sendo inclusive para tempos maiores muito próxima à da seção A sem dreno. As velocidades de recalque das seções B, C e G são aproximadamente coincidentes, sugerindo que os drenos de areia não tiveram eficiência apreciável nesta fase.

Durante a 2ª fase de carregamento, figura V.16, as velocidades de recalques de todas as seções com drenos foram muito próximas, não permitindo com esses resultados uma indicação do tipo de dreno mais eficiente. A velocidade de recalque da seção G seu dreno foi sempre inferior à das seções com drenos indicando de forma genérica que os drenos foram eficazes na aceleração de recalques na 2ª fase de carregamento.

A figura V.15 apresenta as curvas de recalque-tempo para todas as seções do aterro, podendo-se observar as seções que obtiveram os maiores e menores recalques nas 1ª e 2ª fases de carregamento.

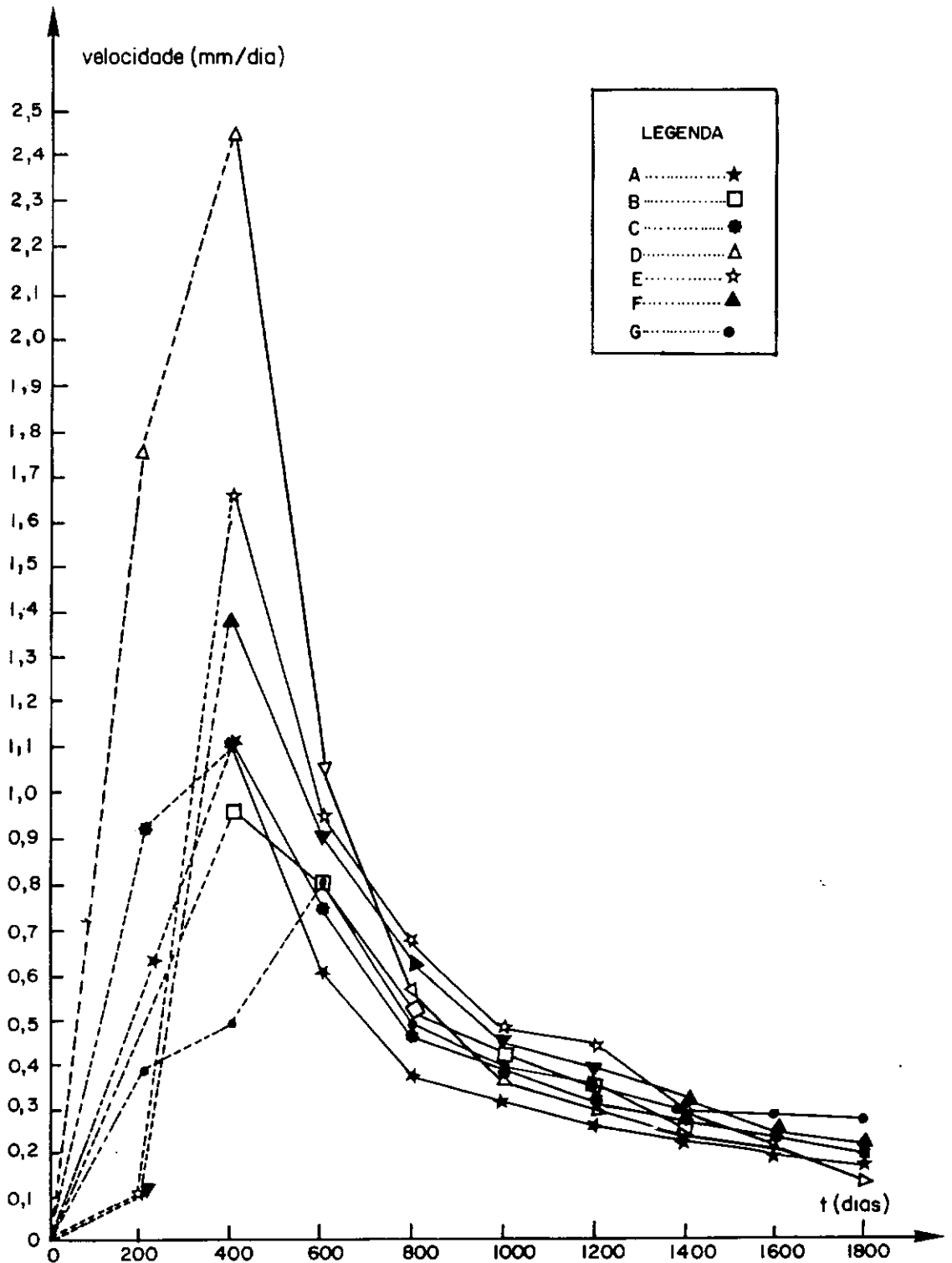


Figura V.13 Gráfico da variação de velocidade ao longo do tempo para as seções A até G na 1ª fase de carregamento.

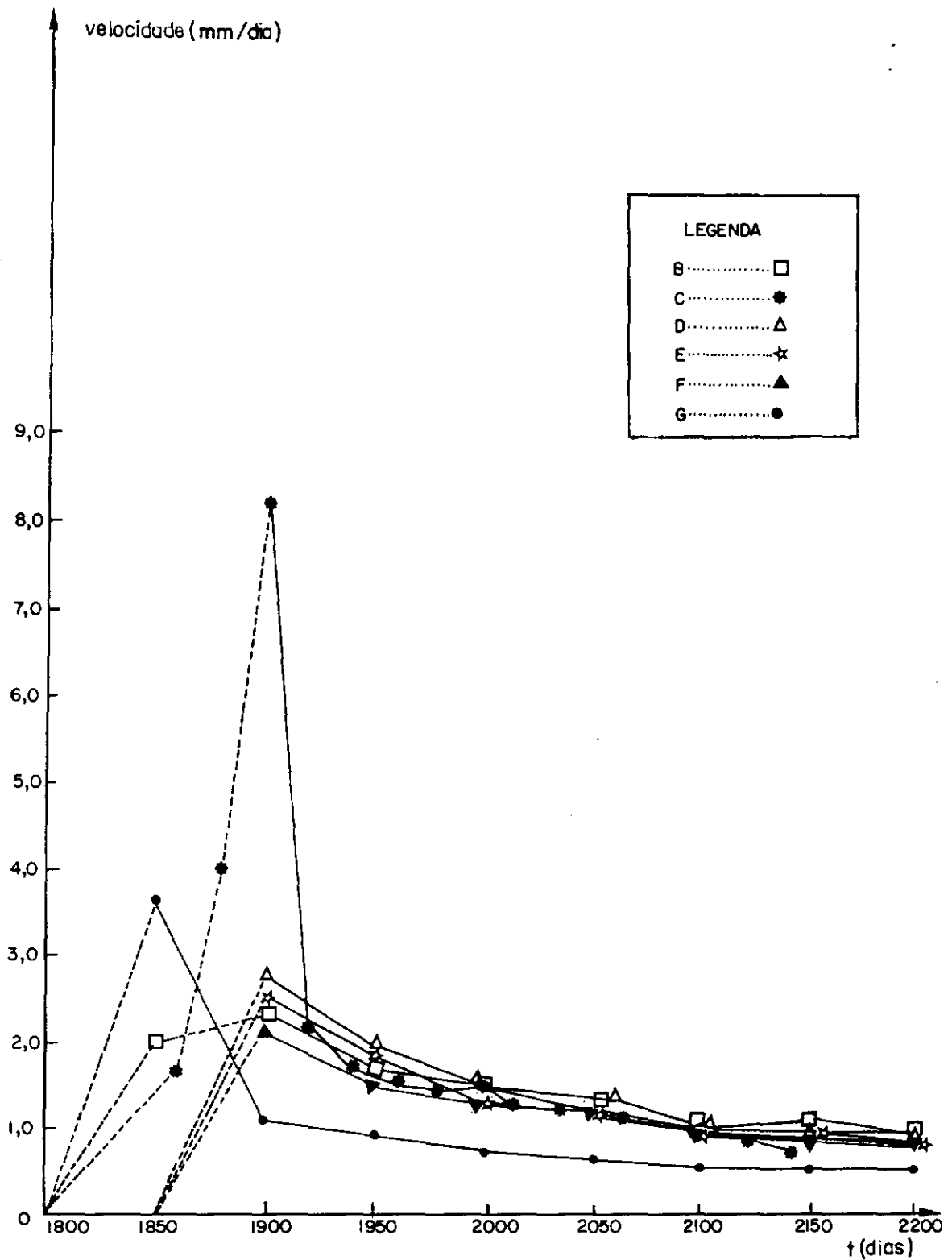


Figura-V.14-Gráfico da variação de velocidade ao longo do tempo para as seções A até G na 2ª fase de carregamento.

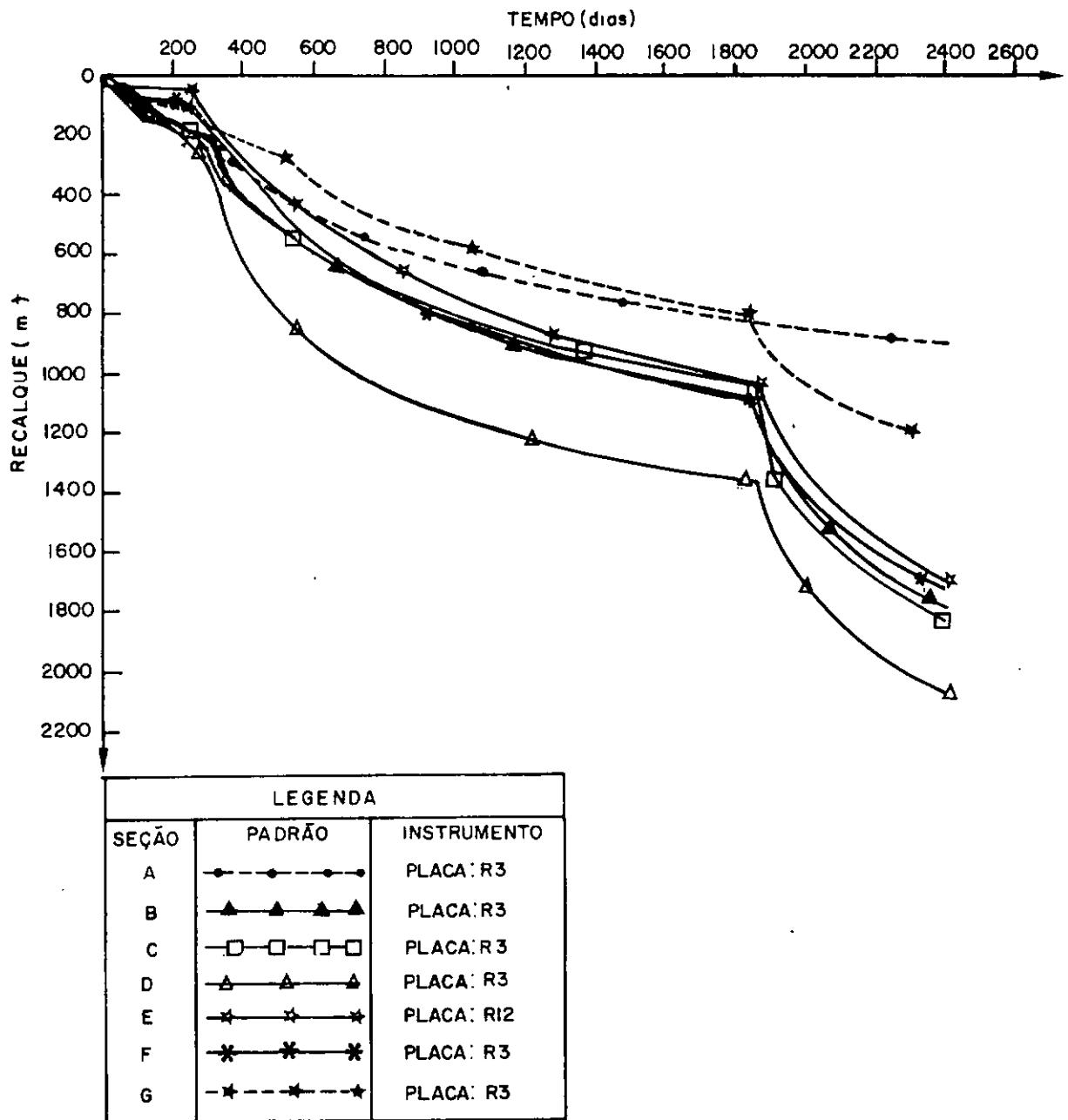


Figura V.15 Curvas de recalque tempo para todas as seções do Aterro II

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

VI.1. INTRODUÇÃO

Esta dissertação teve como objetivo principal aplicar alguns métodos de cálculo de recalques finais e de coeficientes de adensamento a partir dos recalques medidos nas várias seções instrumentadas do Aterro II do IPR-DNER.

Serão apresentados neste capítulo as conclusões e sugestões para pesquisas futuras.

VI.2. CONCLUSÕES

VI.2.1. Recalques Finais

- (a) O método de ASAOKA, aplicável tanto à adensamento unidimensional como à adensamento radial foi o método de mais fácil aplicação e o que proporcionou valores mais consistentes de recalques finais e_{cv} e e_{ch} ;
- (b) Acredita-se que os recalques calculados pelo método de ASAOKA sejam mais realistas que os dos demais métodos incluindo o convencional, sendo esses superiores aos do método de ASAOKA em cerca de 15%;
- (c) Os recalques calculados pelo método de TAN são bastante superiores aos dos demais métodos, o que torna aquele método

do pouco confiável;

- (d) Os resultados dos métodos baseados na velocidade de recalque (ELLSTEIN e LONG e CAREY) são sensíveis ao trecho escolhido, sendo esses métodos de aplicação mais trabalhosa que os outros métodos; entretanto uma escolha adequada do trecho a ser considerado leva a valores razoáveis de recalques finais;
- (e) Tendo em vista as razões acima recomenda-se aplicar o método de ASAKA para o cálculo de recalques finais em depósitos com ou sem drenos verticais;
- (f) Os recalques finais das seções sem drenos foram sensivelmente inferiores aos das seções com drenos;
- (g) Os recalques finais calculados com observações de recalques de até 6 meses de duração são inferiores aos calculados com todos os dados, o que era esperado;
- (h) A análise de recalques torna-se mais simples e mais confiável quando o carregamento é o mais instantâneo possível, conforme ocorrido na 2ª fase de carregamento;
- (i) As curvas medidas de grau de adensamento versus tempo indicaram recalques por compressão secundária médios da ordem de 17% dos recalques por compressão primária no final da 1ª fase de carregamento; cerca de 80% dos recalques primários já haviam ocorrido na 2ª fase de carregamento após cerca de um ano e meio de carregamento.

VI.2.2. Coeficientes de adensamento

- (a) Os valores de c_v foram muito inferiores aos valores de c_h o que não era esperado. Acredita-se que as perturbações oriundas da cravação dos drenos (amolgamento; smear; colmatação e resistência ao material do dreno) sejam responsáveis por esses resultados;
- (b) Acredita-se que os coeficientes de adensamento calculados pelo método de ASAKA sejam os mais realistas resultado este confirmado pela comparação das curvas de grau de adensamento medidas e teóricas.
- (c) Os métodos de velocidade de recalques (ELLSTEIN e LONG e CAREY) requerem certos cuidados para as suas aplicações como a escolha do trecho representativo da curva tempo recalque conforme comentado no item anterior; isto ocorre porque valores de c_v e c_h variam durante o adensamento, mostrando inclusive indicações de que diminuem com o tempo;
- (d) As curvas de recalque ao longo do tempo obtidas pelo método de ASAKA com dados de 6 meses após o carregamento mostram uma boa concordância com as curvas de campo, concordância essa que seria melhor se os recalques por adensamento secundário fossem considerados. A consistência entre as curvas calculadas e observadas foi melhor na 2ª fase de carregamento quando o carregamento foi praticamente instantâneo;
- (e) A concordância entre os valores de c_v e c_h obtidos pelos diferentes métodos é razoável e situam-se nas amplas faixas

dos valores obtidos em ensaios "in situ" e de laboratório. Além disso, observa-se que os valores de c_h das análises de recalques estão próximo ao limite inferior dos ensaios de laboratório;

- (f) Existe boa concordância entre as curvas recalque-tempo calculadas e medidas, na 1ª fase de carregamento, para tempos até 20 ou 30 meses, dependendo da seção; na 2ª fase de carregamento a concordância é em geral muito boa para todo o período observado.

VI.2.3. Eficiência dos drenos

- (a) Os gráficos de velocidades de recalques indicaram que durante a 1ª fase de carregamento as seções com drenos pré-fabricados foram em geral mais eficientes que as seções com drenos de areia;
- (b) Na 1ª fase de carregamento as três seções com drenos de areia não apresentaram eficiência apreciável em relação às seções sem drenos a menos da seção com drenos jateados que se apresentou na fase inicial de adensamento mais eficiente que as outras duas;
- (c) Na 2ª fase de carregamento os drenos foram de uma forma geral eficazes na aceleração de recalques sem uma diferenciação muito clara do tipo de dreno mais eficiente;
- (d) Houve várias evidências de que os procedimentos adotados de cravação dos drenos perturbaram o solo diminuindo a permeabilidade e o coeficiente de adensamento deste.

VI.3. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

As sugestões para pesquisas futuras serão divi
das em dois tópicos: os estudos analíticos e teóricos e os
 estudos experimentais, abordados separadamente abaixo.

VI.3.1. Estudos analíticos

- (a) Aplicação de outros métodos (e.g., ESCARIO e URIEL^[19] ,
 SCOTT^[41] e GOULD^[22]) para a análise de recalques e compara
 ção com os resultados aqui obtidos.
- (b) Cálculo de coeficientes de adensamento através de poro
 pressões medidas e comparação com os valores aqui obtido
 dos através de recalques medidos.
- (c) Avaliação da influência do "smear" e da perda de carga no
 dreno (utilizando-se a formulação de HANSBO^[23] por exempl
 o) além de consideração da drenagem vertical concomitan
 te com a drenagem radial, a exemplo das análises realiza
 das por ERIKSON e EKSTROM^[18].
- (d) Estudo da compressão secundária a partir dos dados de
 recalques da 1ª fase de carregamento incluindo comparação
 de valores de c_{α} retroanalizados de dados de campo
 com c_{α} obtidos em laboratório;
- (e) Aplicação de programas de diferenças finitas para adensamen
 to vertical e/ou radial para o cálculo teórico de curvas
 recalque-tempo e consideração de compressão secundária,
 carga variável com o tempo e preferencialmente com
 formulação em termos de permeabilidade k (função $\log k$:ín

dice de vazios) visto ser essa superior à formulação em termos de coeficientes de adensamento;

- (f) aplicação do programa de elementos finitos CRISP para o cálculo bidimensional de recalques, deslocamentos laterais e poro-pressões nas seções A e G sem drenos do Aterro II, a exemplo dos cálculos já realizados para o Aterro I (ALMEIDA e ORTIGÃO^[2]).

IV.3.2. Estudos experimentais

- (a) realização de ensaios adicionais de adensamento oedométrico para uma melhor definição dos valores de c_v e c_h de laboratório para as faixas de pressão utilizadas em campo,
- (b) realização de ensaios de dissipação com o piezocone sob o aterro visando a determinação dos valores de c_h em cada uma das seções transversais para a 2ª fase de carregamento e comparação com as outras determinações apresentadas na tabela V.8,
- (c) realização de ensaios de cravação com o piezocone sob o aterro e comparação dos valores de resistência de ponta medidos em cada uma das seções transversais para efeito de estimativa do ganho de resistência,
- (d) interpretação dos ensaios de palheta realizados até o momento e determinação dos ganhos de resistência ΔS_u obtidos em cada uma das seções e comparação com os valores respectivos calculados teoricamente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ALMEIDA, M.S.S. "Analysis of the behaviour of an embankment on soft clay, M. Phil thesis, Universidade de Cambridge, Inglaterra (1981).

- [2] ALMEIDA, M.S.S., RAMALHO-ORTIGÃO, J.A., "Performance and finite element analysis of a trial embankment on soft clay". Numerical Models in Geomechanics, International Symposium on Numerical Models in Geomechanics, Zurich, Chap. 4 - Application of numerical models to the solution of practical problems. Edited by R. Dungar, G.N. Paude, J.A. Studer. (1982)

- [3] ALMEIDA, M.S.S., Davies, M.C.R. e PARRY, R.H.H. "Centrifuge tests of embankments on strengthened and instrengthened clay foundations". Géotechnique, vol. XXXV, nº 4, december. (1985)

- [4] AOKI-Construction Co. Ltda. "Improvement for ground". Main Office. No. 5, Minami 1-chome, Oyodo-cho Oyodo-Ku, Osaka. (1975)

- [5] ASAOKA, A. "Observational procedure of settlement prediction". Soils and Foundations, vol. 18, nº 4, december, pp. 87-101. (1978)

- [6] BALASUBRAMANIAM, A.S., e BRENNER, R.P. "Consolidation and Settlement of Soft Clay". Soft Clay Engineering, edited by Brand, E.W. e Brenner, R.P. - Chapter 7 - 481-557. (1981)

- [7] BARRON, R.A. "Consolidation of fine-grained soils by drain wells". ASCE, Transactions, vol. 113, pp.718-754. (1947)

- [8] CARRILLO, N. "Simple two and three Dimensional cases in the Theory of Consolidation of Soils". Journal of Mathematics and Physics, citado por Terzaghi^[45]. (1942).

- [9] CARRILLO, N. "Determinación del grade de Consolidación Primaria a partir de Observaciones de Campo". Memorial del Congresso Científico Mexicano, UNAM., México; 9-13, citado por ELLSTEIN^[16,17]. (1953).

- [10] COLLET, Haroldo Braune. "O Aterro Experimental II do IPR: da sua concepção à uma análise de recalques". Relatório de Pesquisa - IPR-DNER. (1983).

- [11] COLLET, Haroldo Braune. "O Aterro Experimental II do IPR: da sua concepção à uma análise de recalques": Tese para concurso para professor titular do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal Fluminense. (1985).

- [12] COSTA FILHO, L.M.; ARAGÃO, C.J.G.; VELLOSO, P.P.C. "Características Geotécnicas de alguns depósitos de argila mole na área do grande Rio de Janeiro". Solos e Rochas - vol. 8, nº 1 - abril, pp. 3-13 (1985).

- [13] COUTINHO, R.Q. "Características de Adensamento com Drenagem Radial de uma Argila Mole da Baixada Fluminense". Tese submetida ao corpo docente da COPPE/UFRJ para obtenção do grau de Mestre em Ciências. (1976)

- [14] COUTINHO, R.Q. e LACERDA, W.A. "Características de Adensamento com Drenagem Radial e Vertical da Argila Cinza do Rio de Janeiro". Relatório de Pesquisa 2.019-02.02-2/03/42 - Instituto de Pesquisas Rodoviárias - Divisão de Pesquisas. (1976).

- [15] CRUZ, P.T. & SAES, S.L. "Problemas de Mecânica dos Solos". Escola Politécnica da USP - Departamento de Publicações. (1972).

- [16] ELLSTEIN, A. "Settlement prediction through the sinking rate". Revista Latino Americana de Geotécnica, vol. 1, nº 3, pp. 231-237. (1971)

- [17] ELLSTEIN, A. "Settlement development: observed vs. predicted". Proceedings ASCE Specialty Conference on Perform. of Earth and Earth Supported Structures, Purdue, LaFayette, Ind., vol. 1-2, pp. 1073-1085. (1972).

- [18] ERICKSON, L.; EKSTRON, A.. "The efficiency of three different types of vertical drain - Results from a full-scale Test". Proceedings of the VIII ECSMFE, Helsinki'83, Improvement of ground. (1983)

- [19] ESCARIO, V. e URIEL, S. "Determining the coefficient of consolidation and horizontal permeability by radial drainage. Proc. Vth Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engg., Paris, Vol. 1, pp. 83-87.(1961)

- [20] GERSCOVICH, D. S.; COSTA FILHO, L. de M.; BRESSANI, L.A. "Propriedades Geotécnicas da Camada Ressecada de um Depósito de Argila Mole da Baixada Fluminense". VIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações. Porto Alegre, pp. 289-300, vol. II. MS-1: Solos. (1986)

- [21] GIROUD, J.P., "Tables pour le calcul des fondations", Paris, PUNOD, VOL.IV (1972)

- [22] GOULD, J.P.; "Analysis of Pore Pressure and Settlement Observations at Logan International Airport", Harward Soil Mechanics Series, nº 34, Harward University, Dec. (1944).

- [23] HANSBO, S.; "Consolidation of clay by band-shaped prefabricated drains". Ground Engng. july, vol. 12, No. 5. (1979)

- [24] HOLTZ, R. e BROMS, B. "Long-term loading tests at Skadeby-Sweden". ASCE, Spec. Conference, Purdue Conf. LaFayette, Ind., june, vol. 1, part 1, 435-465, Erratum; vol. 3, p. 73, citado por MAGNAN[29]. (1972)

- [25] JOHNSON, S.J. **"Foundation Precompression with vertical Sand drains"**. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, vol. 96. nº SM1, 145-175. citado por COUTINHO^[13]. (1970).

- [26] KJELLMAN, W. **"Accelerating consolidation of fine grained soils by means of cardboard wicks"**. 2ème Congrès International de Mécanique des Sols et des Travaux de Fondation, Rotterdam, vol. 2, 302-305, citado por MAGNAN^[29]. (1948).

- [27] LAMBE, T.W. e WHITMAN, R.S. **"Soil Mechanics"**. Edited by John Wiley & Sons, Inc. (1969).

- [28] LONG, R.P.; CAREY, P.J. **"Analysis of settlement data from sand-drained areas"**. Transportation Research Record, Washington, nº 678, pp. 37-40 (1978).

- [29] MAGNAN, J.P. e DEROY, J.M. **"Analyse graphique des tassements observés sous les ouvrages"**. Bull. Liaison Laboratoires des Ponts e Chaussées, Paris, 109, sept-oct., pp. 9-21. (1980).

- [30] MAGNAN, Jean-Pierre. **"Theórie et Pratique des Drains verticaux"**. Technique et Documentation (Lavoisier), (1983).

- [31] MAGNAN, J.P., PILOT, G., QUEYROI, D.; **"Back Analysis of Soil Consolidation Around Vertical Drains"**, Proceedings of the VIII ECSMFE, Helsinki (1983).

- [32] MASSAD, Façal. "Método Gráfico para o acompanhamento da evolução dos recalques com o tempo". VIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações. Olinda, Recife, setembro, pp. 321 a 332. (1982).
- [33] MIKASA, M. "Consolidation of Soft Clay". Tokio, Kajima-Shuppan-Kai. citado por ASAOKA[5]. (1963)
- [34] MORAN, PROCTOR, MUESER e RUTLEDGE. "Study of Deep Soil Stabilization by vertical Sand Drains", Report to Bureau of Yards and Docks, Department of the Navy, Noy 88812, Washington, D.C. (1958)
- [35] NAVFAC, D.M.-7. "Soil Mechanics, Foundation and Earth Structures Design Manual, U.S. Department of the Naval Facilities Engineering Command", Washington, D.C. (1971)
- [36] ORTIGÃO, J.A.R. "Aterro Experimental levado à ruptura sobre a argila cinza do Rio de Janeiro". Tese de Doutorado - COPPE/UFRJ. (1980)
- [37] ORTIGÃO, J.A.R., COLLET, H. B. "A eliminação de erros de atrito em ensaios de palheta". Solos e Rochas - vol. 9 - nº 2 - pp. 33-45. agosto (1986)
- [38] RICHART JR., F.E. "Review of the Theories for Sand Drains". Transactions, ASCE, vol. 124, p. 709. (1959)

- [39] SANDRONI, S.S. "COMunicação pessoal dos professores Marcio Almeida e Willy de A. Lacerda". (1988)

- [40] SCHMERTMANN, S.H. "The Undisterled Consolidation Behavior of Clay". Transactions ASCE, Paper nº 2775. (1955)

- [41] SCOTT, R.F. "New method of consolidation coefficient evaluation". J. Soil Mech. Found. Div., ASCE, 87 (SM1), pp. 29-39. (1961)

- [42] SILLS, G.C.; ALMEIDA, M.S.S.; DANZIGER, F.A.B. "Coefficient of consolidation from piezocone dissipation tests in a very soft clay". International Symposium on Penetration Test. Orlando, março. (1988)

- [43] TAN, S.B. "Empirical method for estimating secondary and total settlement". Proceedings 4th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Bangkok, vol. 2, 147-151. (1971)

- [44] TAYLOR, Donald W. "Soil Mechanics". Wiley International Edition New York. John Wiley & Sons, Inc. London. (1948).

- [45] TERZAGHI, K. "Theoretical Soil Mechanics". John Wiley & Sons. New York. Chichester. Brisbane. Toronto. Singapore. (1943).

- [46] TERZAGHI, K. "Drainage of clay strata by filter wells".
Civil Engineering, Easton, Pa., vol. 15, 463-464.
ASCE. (1945)

- [47] TRAUTWEIN, S. J.; OLSON, R.E. e THOMAS, R.L. "Radial
flow consolidation testing". Proc. ~~Xth~~th Int. Conf: on
Soil Mech. and Found. Engg., Vol. 1, pp. 811-814.
(1981).

- [48] WERNECK, M.L.G., COSTA FILHO, L.M. e FRANÇA, H. "In
Situ Permeability and Hidraulic Fracture Tests in Gua-
nabara Bay Clay". proc. of the International Symposium
on Soft Clay, Asian Institute of Technology, Bangkok,
Tailand, pp. 399-415 (1977).

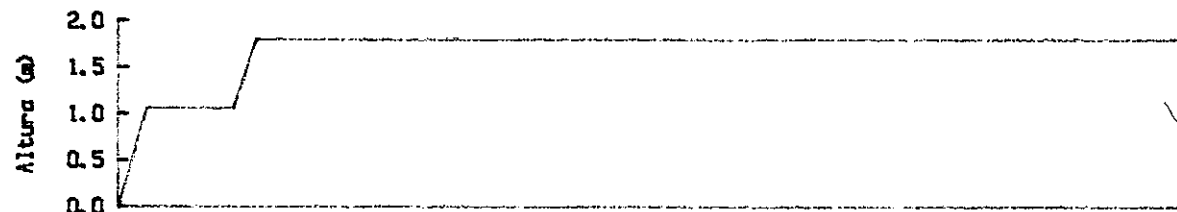
- [49] WINTERKORN, H.F. e FANG, H. "Foundation Engineering
Handbook". Van Nostrand Reinbold Company (1975)

APÊNDICE A

CURVAS DAS PLACAS DE RECALQUE INSTALADAS NO
ATERRO EXPERIMENTAL II OBTIDAS PELO "PROGRAMA SARAPUÍ"

As figuras A.1 à A.7 mostram as curvas de recalque - tempo das placas de recalque transversais e as figuras A.3 à A. 17 mostram as mesmas curvas das placas de recalque localizadas ao longo do eixo longitudinal de cada seção do aterro.

O croqui da localização das placas de recalque em cada seção são apresentadas na figura A.18.

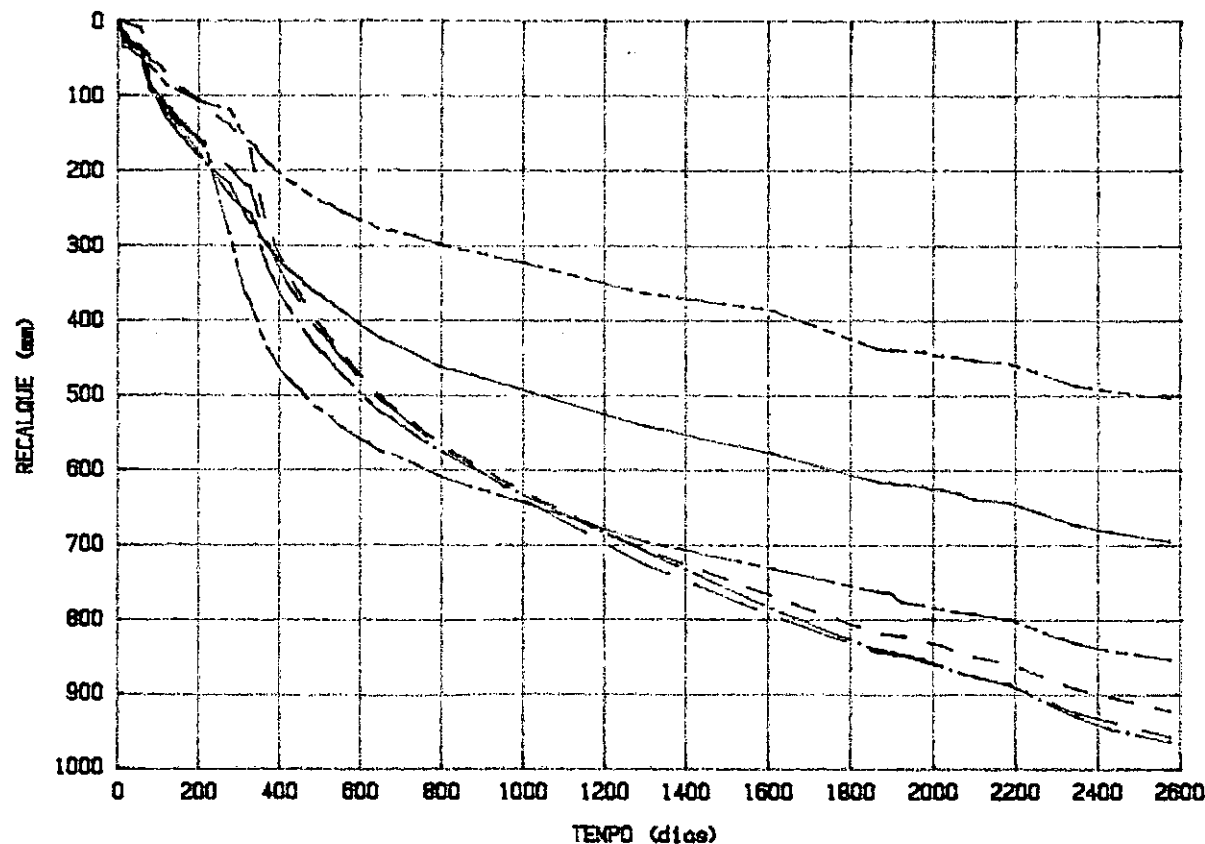


Aterro Experimental II

Gráficos: Recalque x Tempo

Data: 21/11/80 à 03/01/88

1a. e 2a. Etapas



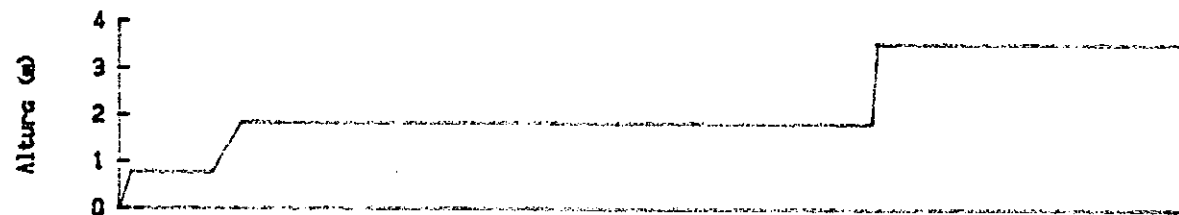
Padrão	Seção	Instrumento
—	A	Placa : R1
- - -	A	Placa : R2
— · —	A	Placa : R3
— · — · —	A	Placa : R4
— · — · — · —	A	Placa : R5
- - - - -	A	Placa : R6

Escalas :

Ordenada → 1:10.00

Abcissa → 1:18.5

FIGURA A.1. CURVAS DE RECALQUE-TEMPO DAS PLACAS DE RECALQUE INSTALADAS AO LONGO DO EIXO TRANSVERSAL CENTRAL DE CADA SEÇÃO

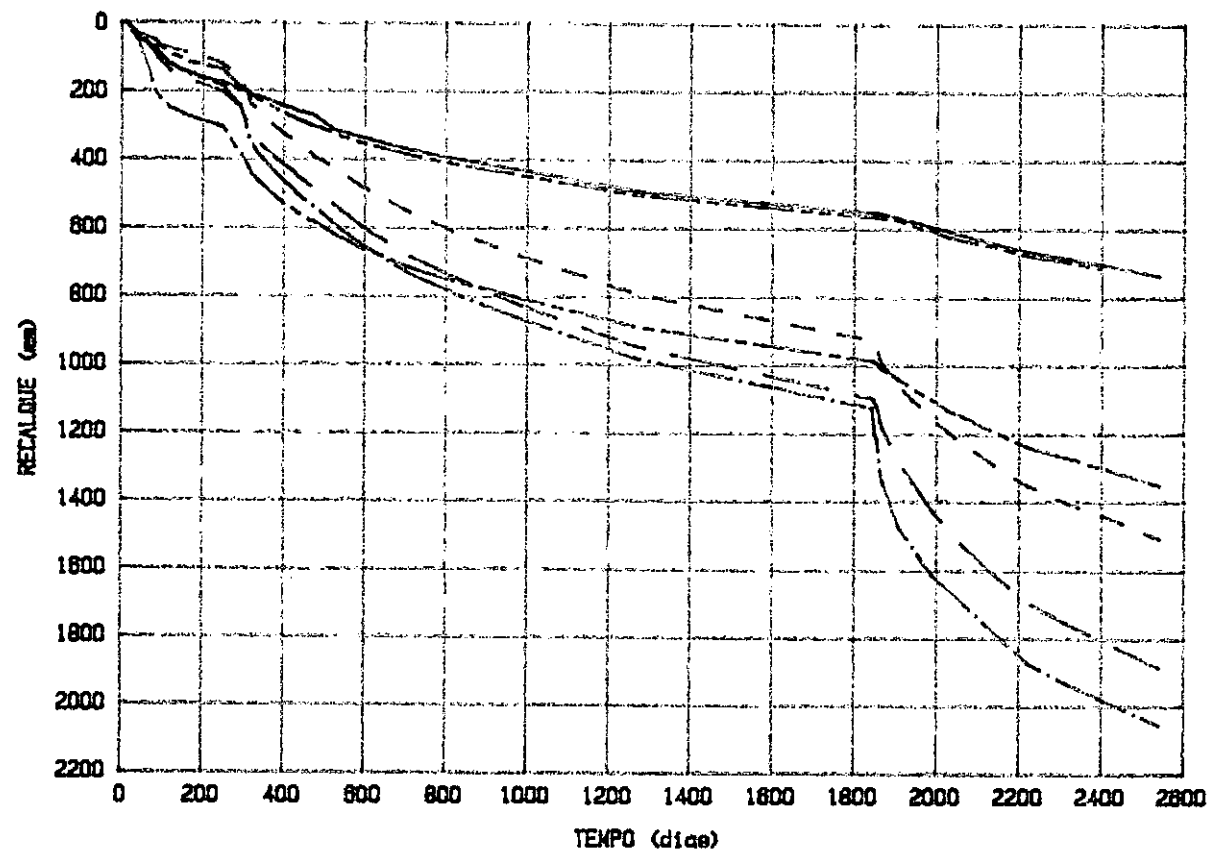


Aterro Experimental II

Gráfico: Recalque x Tempo

Data: 24/12/80 à 05/02/88

1a. e 2a. Etapas



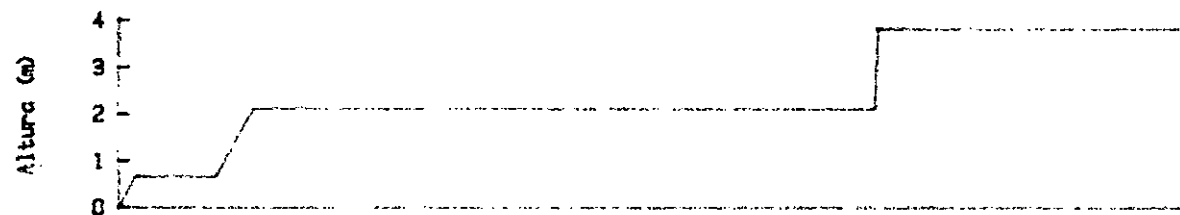
Padrão	Seção	Instrumento
—	B	Placa : R1
- - -	B	Placa : R2
---	B	Placa : R3
----	B	Placa : R4
-----	B	Placa : R5
- - - - -	B	Placa : R6

Escala :

Ordenada → 1:22.0

Abcissa → 1:18.5

FIGURA A.2. CURVAS DE RECALQUE-TEMPO DAS PLACAS DE RECALQUE INSTALADAS AO LONGO DO EIXO TRANSVERSAL CENTRAL DE CADA SEÇÃO

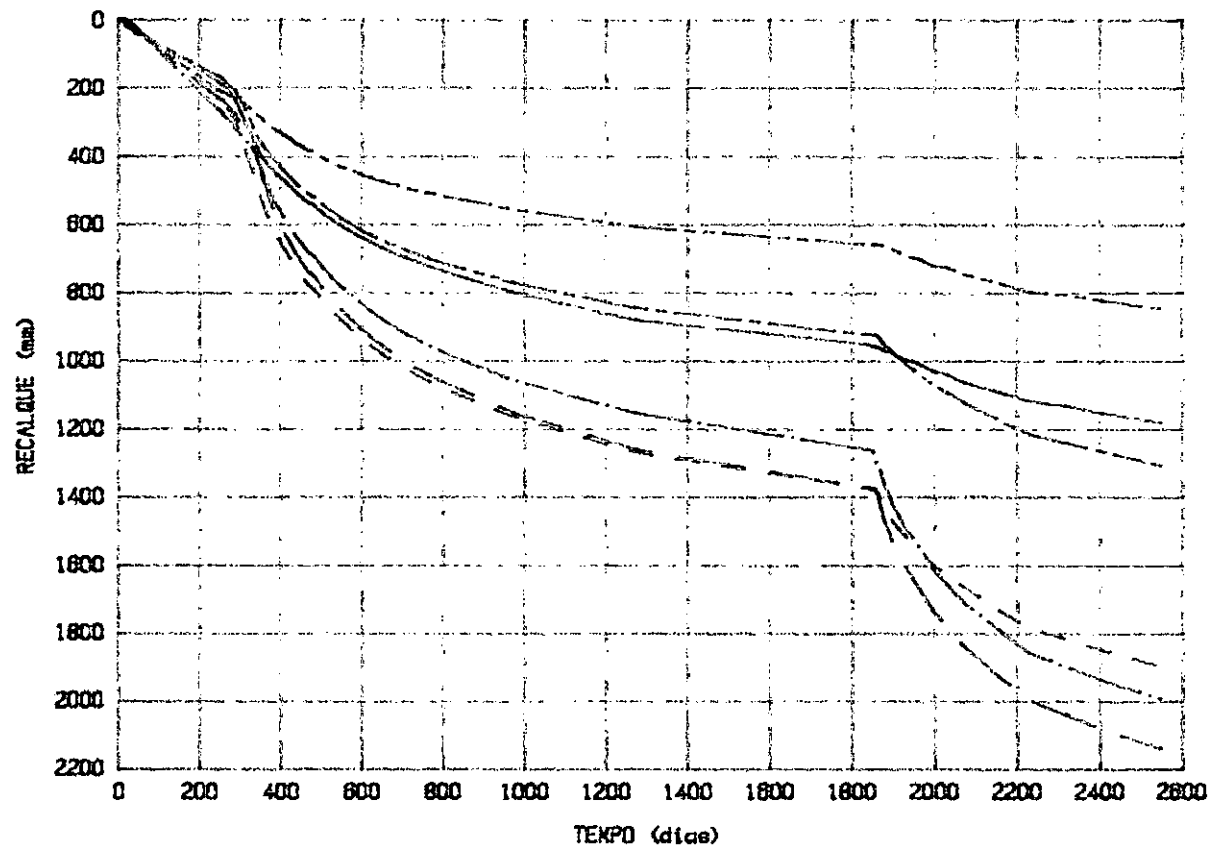


Aterro Experimental II

Gráfico: Recalque x Tempo

Data: 18/12/80 a 30/01/88

1a. e 2a. Etapas



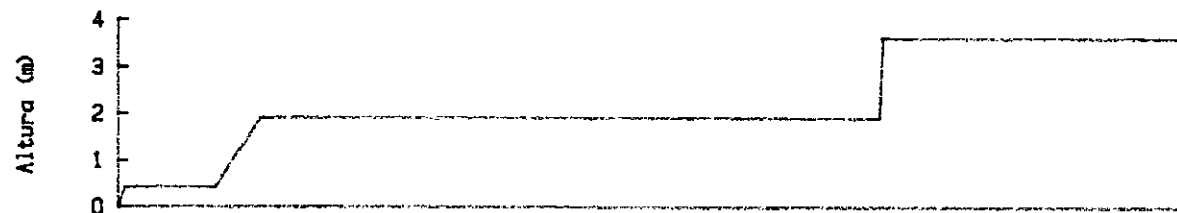
Padrão	Seção	Instrumento
—	D	Placa : R1
- - -	D	Placa : R2
— · —	D	Placa : R3
— · —	D	Placa : R4
— · —	D	Placa : R5
— · —	D	Placa : R6

Escala :

Ordenada ~ 1:22.0

Abcissa ~ 1:18.5

FIGURA A.3. CURVAS DE RECALQUE-TEMPO DAS PLACAS DE RECALQUE INSTALADAS AO LONGO DO EIXO TRANSVERSAL CENTRAL DE CADA SEÇÃO

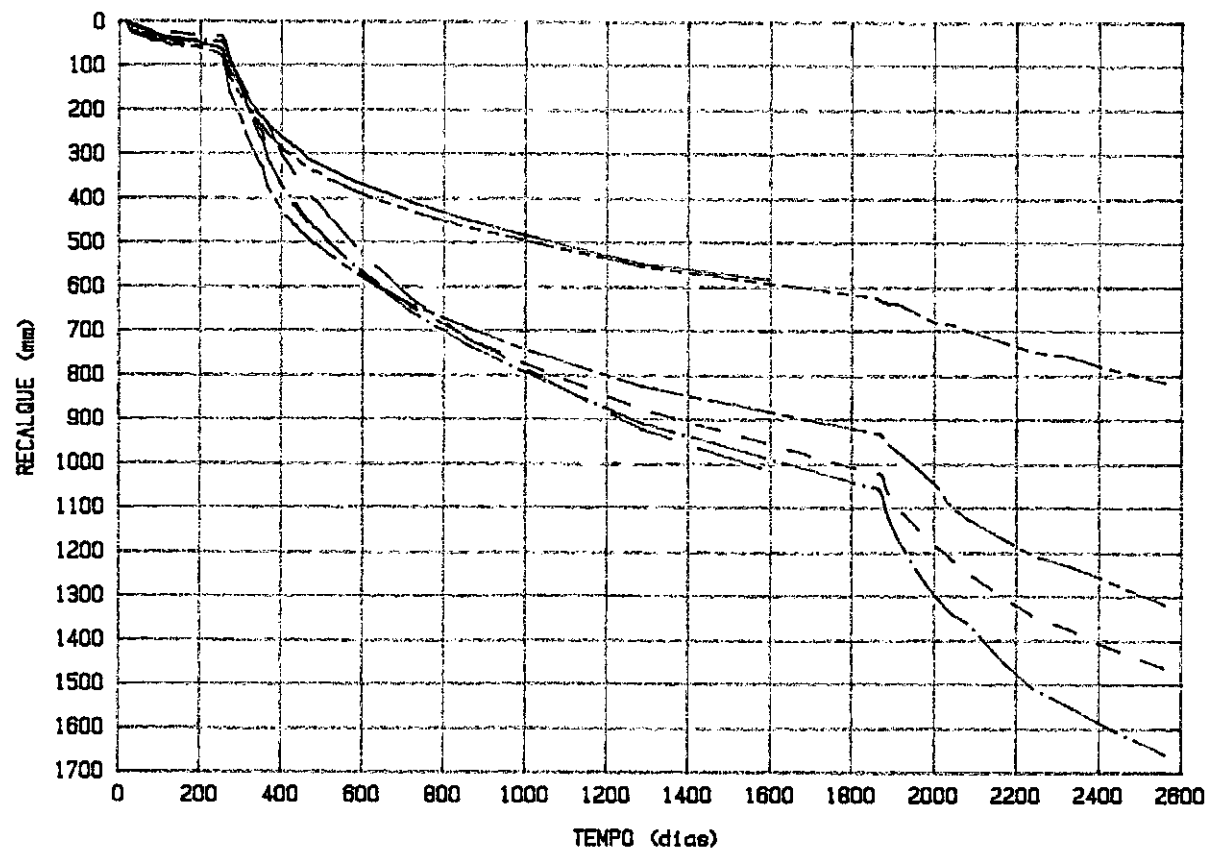


Aterro Experimental II

Gráfico: Recalque x Tempo

Data: 06/12/80 à 18/01/88

1a. e 2a. Etapas



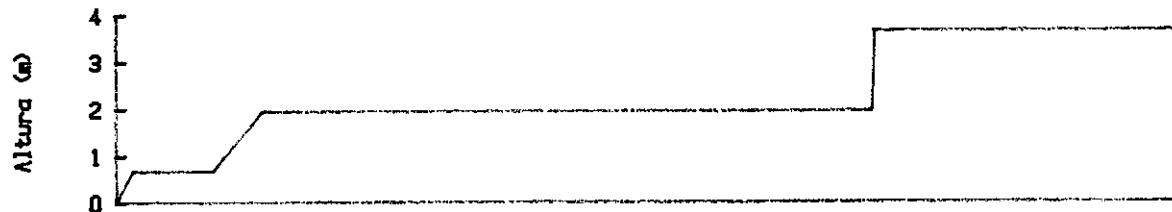
Padrão	Seção	Instrumento
—————	E	Placa : R1
- - - - -	E	Placa : R2
—————	E	Placa : R3
—————	E	Placa : R4
- - - - -	E	Placa : R5
—————	E	Placa : R6

Escalas :

Ordenada → 1:17.0

Abcissa → 1:18.5

FIGURA A.4. CURVAS DE RECALQUE-TEMPO DAS PLACAS DE RECALQUE INSTALADAS AO LONGO DO EIXO TRANSVERSAL CENTRAL DE CADA SEÇÃO

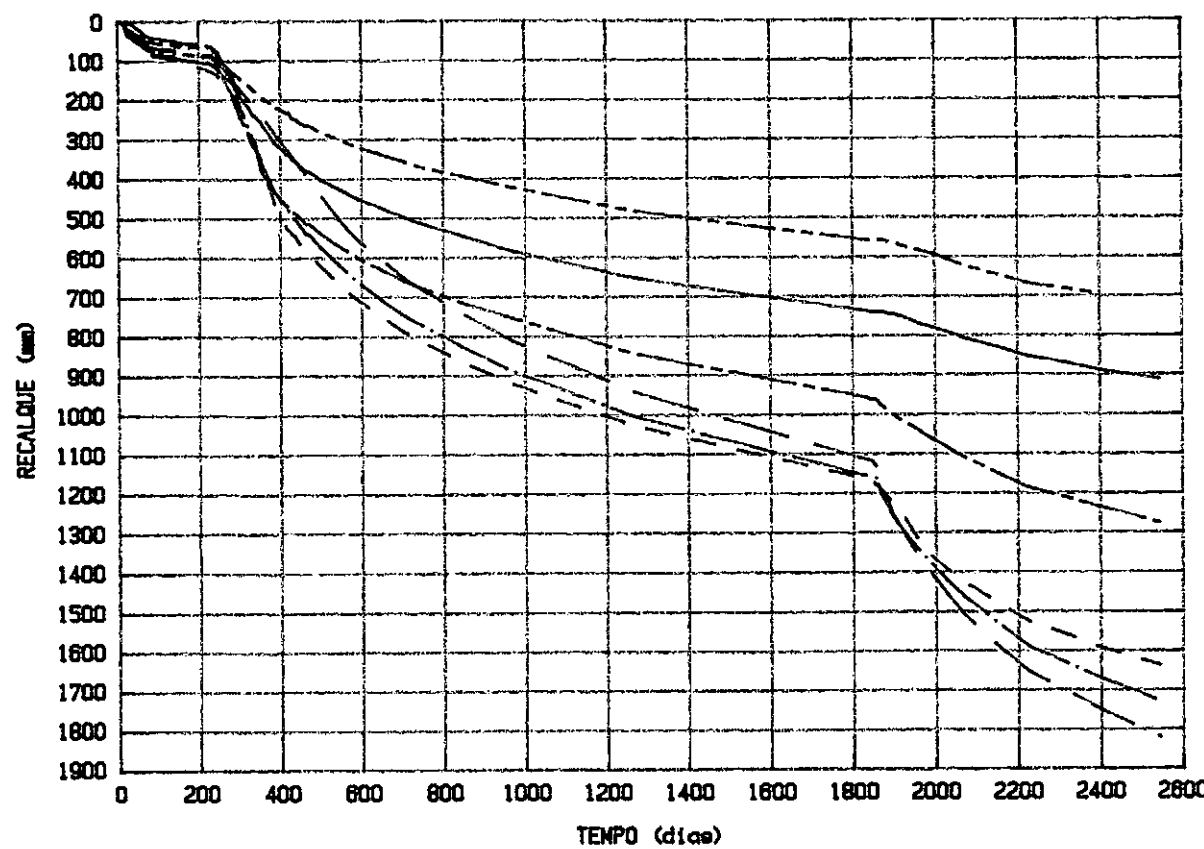


Aterro Experimental II

Gráfico: Recalque x Tempo

Data: 21/12/80 à 02/02/88

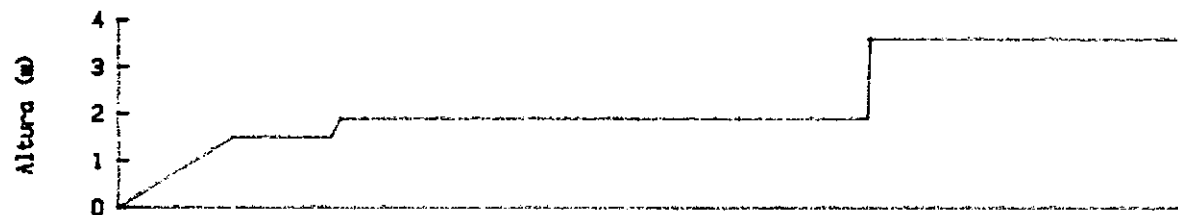
1a. e 2a. Etapas



Padrão	Seção	Instrumento
—————	F	Placa : R1
- - - - -	F	Placa : R2
—————	F	Placa : R3
- - - - -	F	Placa : R4
—————	F	Placa : R5
- - - - -	F	Placa : R6

Escalas :
 Ordenada -> 1:19.0
 Abscissa -> 1:18.5

FIGURA A.5. CURVAS DE RECALQUE-TEMPO DAS PLACAS DE RECALQUE INSTALADAS AO LONGO DO EIXO TRANSVERSAL CENTRAL DE CADA SEÇÃO

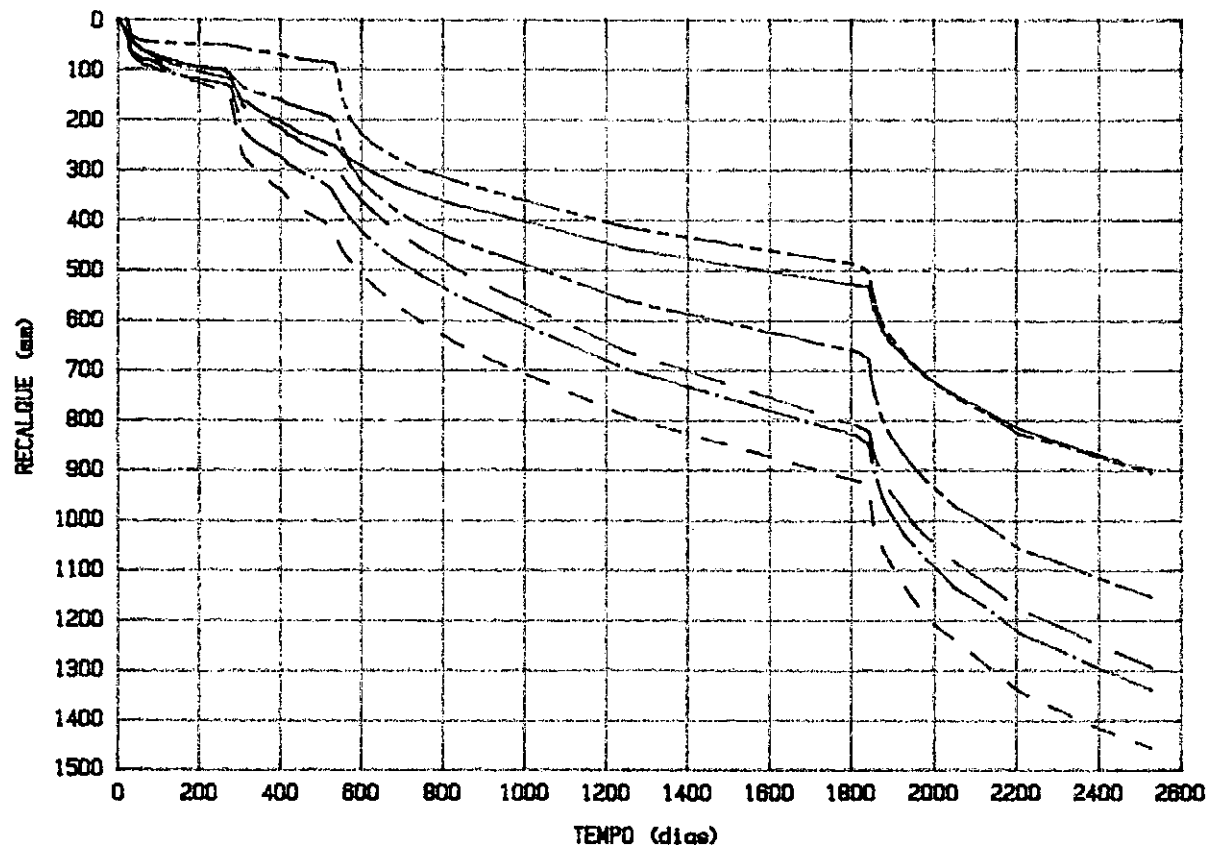


Aterro Experimental II

Gráfico: Recalque x Tempo

Data: 08/01/81 a 20/02/88

1a. e 2a. Etapas



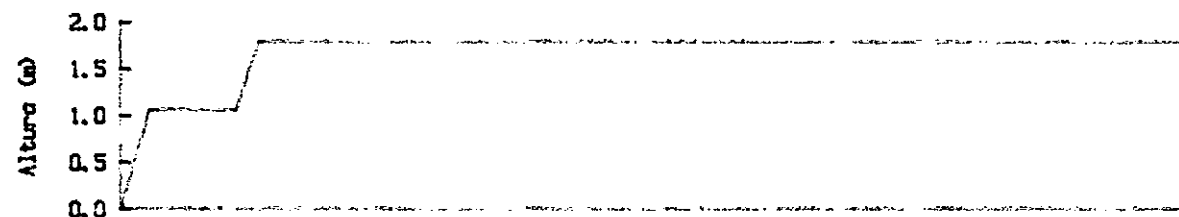
Padrão	Seção	Instrumento
—	G	Placa : R1
- - -	G	Placa : R2
— · —	G	Placa : R3
— · — · —	G	Placa : R4
- - - - -	G	Placa : R5
— · — · — · —	G	Placa : R6

Escala :

Ordenada - 1:15.0

Abcissa - 1:18.5

FIGURA A.6. CURVAS DE RECALQUE-TEMPO DAS PLACAS DE RECALQUE INSTALADAS AO LONGO DO EIXO TRANSVERSAL CENTRAL DE CADA SEÇÃO

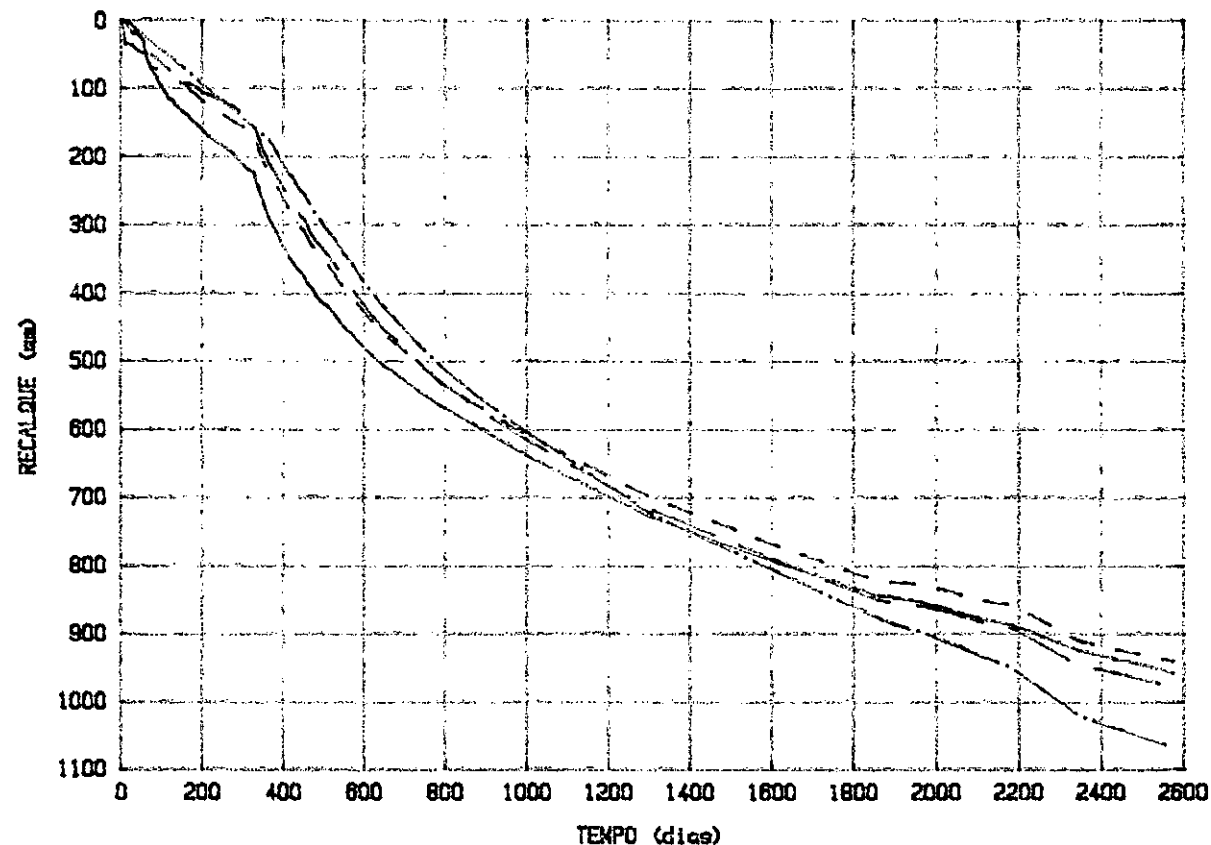


Aterro Experimental II

Gráfico: Recalque x Tempo

Data: 21/11/80 à 03/01/88

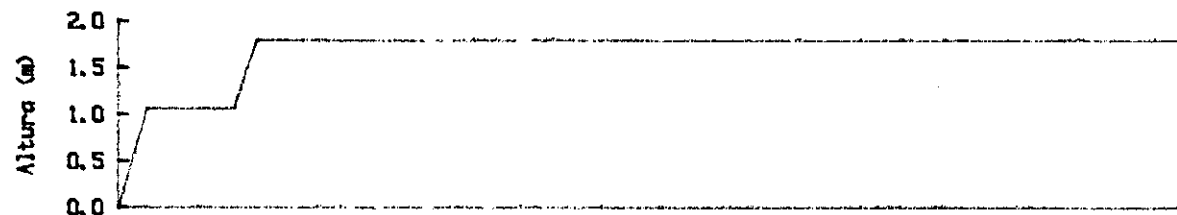
1a. e 2a. Etapas



Padrão	Seção	Instrumento
— — — — —	A	Placa : R3
— — — — —	A	Placa : R12
— — — — —	A	Placa : R11
— — — — —	A	Placa : R10

Escalas :
 Ordenada ~ 1:11.0
 Abscissa ~ 1:18.5

FIGURA A.7. CURVAS DE RECALQUE-TEMPO DAS PLACAS DE RECALQUE INSTALADAS AO LONGO DO EIXO LONGITUDINAL DO ATERRO.

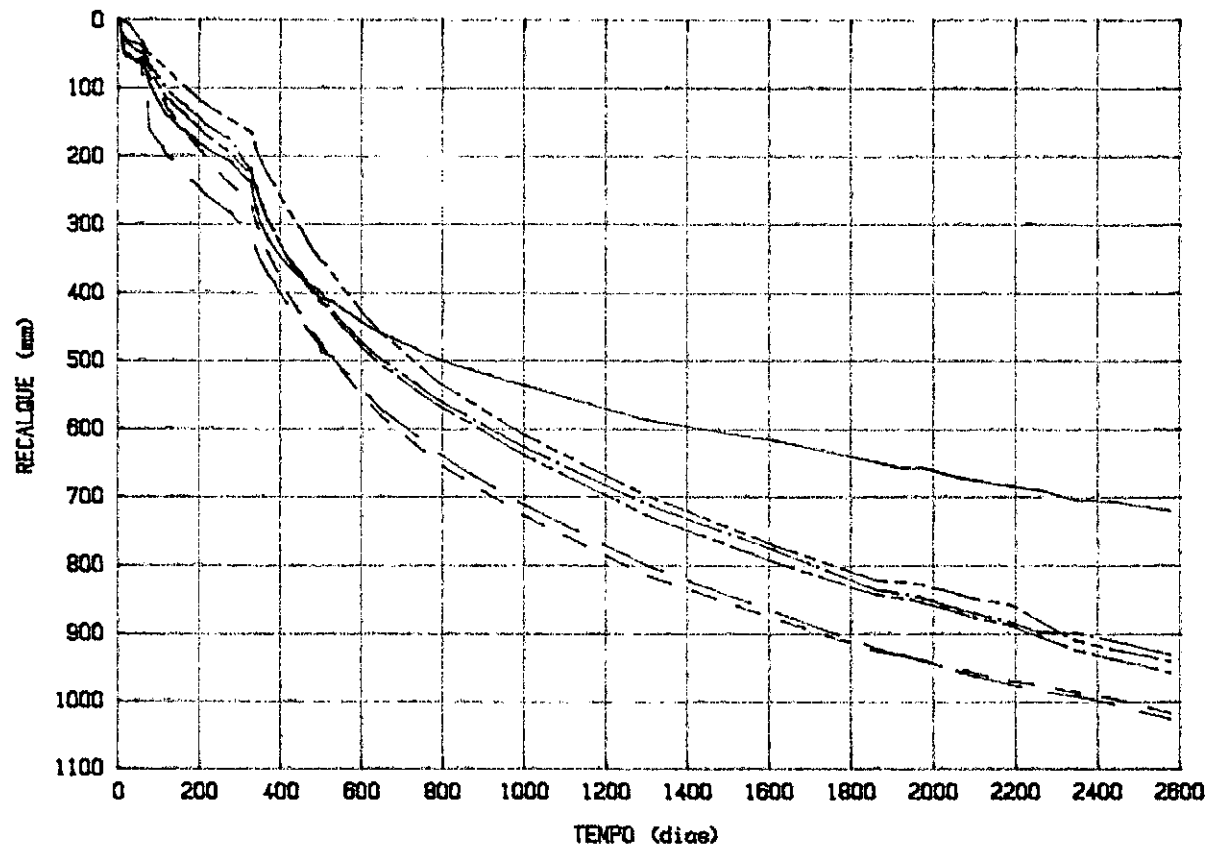


Aterro Experimental II

Gráfico: Recalque x Tempo

Data: 21/11/80 a 03/01/88

1a. e 2a. Etapas



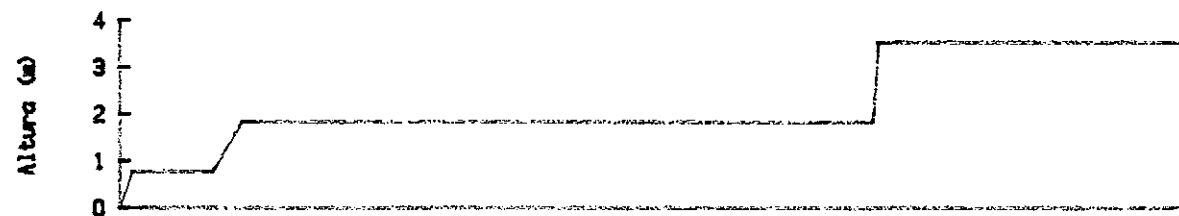
Padrão	Seção	Instrumento
—	A	Placa : R16
- - -	A	Placa : R15
— — —	A	Placa : R14
— · — · —	A	Placa : R13
— · — · —	A	Placa : R3
— · — · —	A	Placa : R12

Escalas :

Ordenada → 1:11.0

Abcissa → 1:18.5

FIGURA A.8. CURVAS DE RECALQUE-TEMPO DAS PLACAS DE RECALQUE INSTALADAS AO LONGO DO EIXO LONGITUDINAL DO ATERRO.

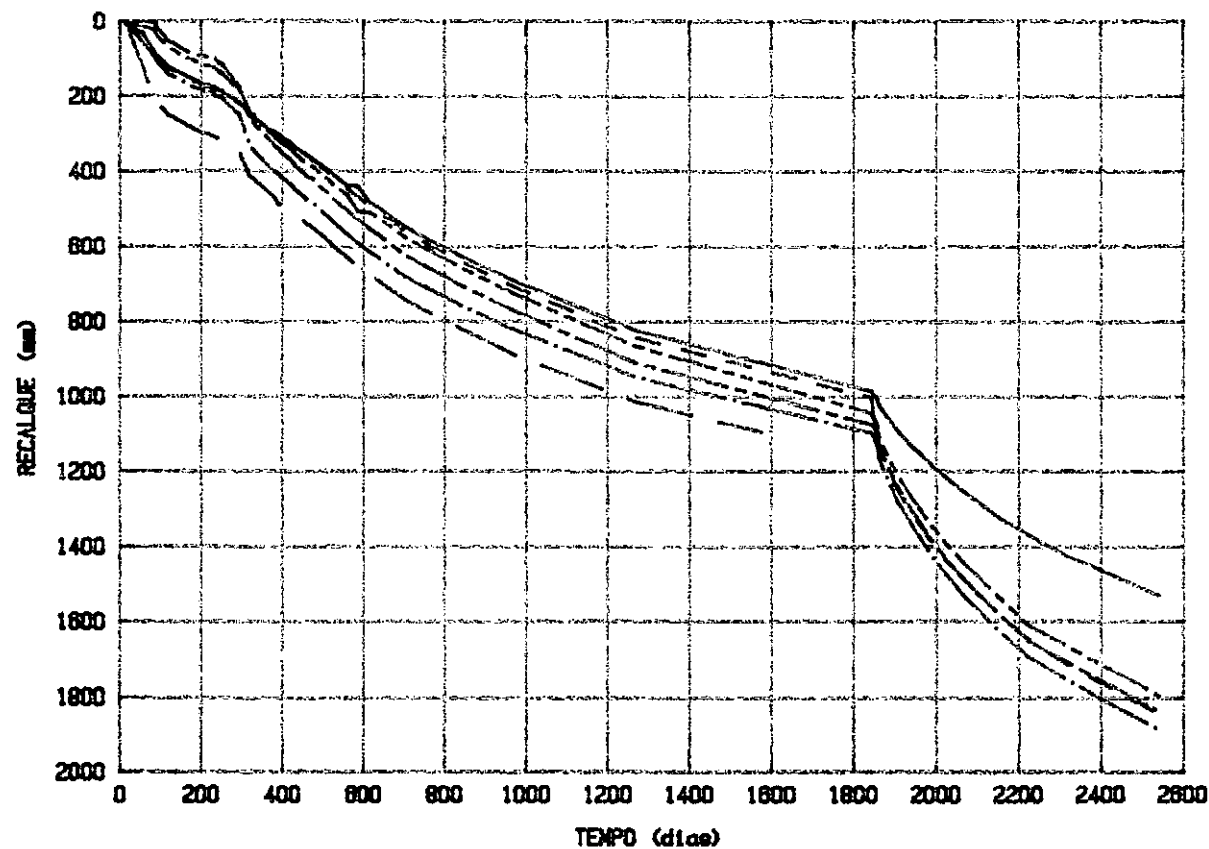


Aterro Experimental II

Gráfico: Recalque x Tempo

Data: 24/12/80 a 05/02/88

1a. e 2a. Etapas



Padrão	Seção	Instrumento
—————	B	Placa : R11
- - - - -	B	Placa : R12
—————	B	Placa : R13
—————	B	Placa : R3
—————	B	Placa : R14
—————	B	Placa : R15

Escala :

Ordenada → 1:20.0

Abcissa → 1:18.5

FIGURA A.9. CURVAS DE RECALQUE-TEMPO DAS PLACAS DE RECALQUE INSTALADAS AO LONGO DO EIXO LONGITUDINAL DO ATERRO.

Aterro Experimental II

Gráficos: Recalque x Tempo

Data: 24/12/80 à 05/02/88

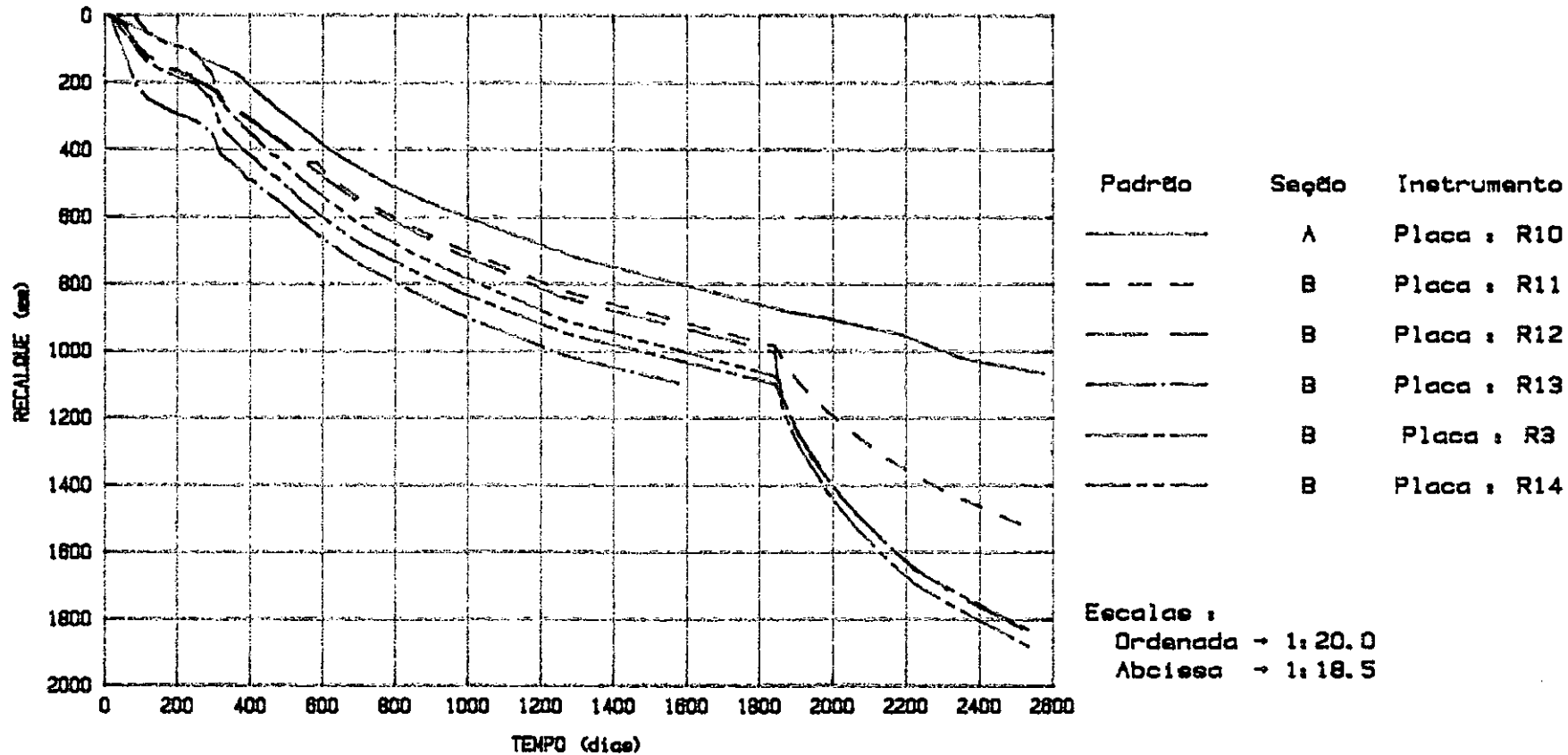
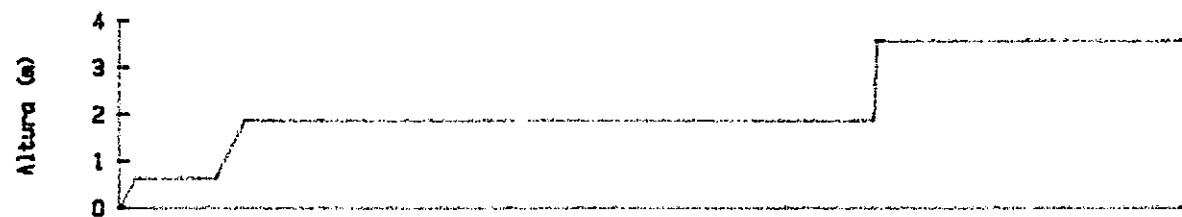


FIGURA A.10. CURVAS DE RECALQUE-TEMPO DAS PLACAS DE RECALQUE INSTALADAS AO LONGO DO EIXO LONGITUDINAL DO ATERRO.

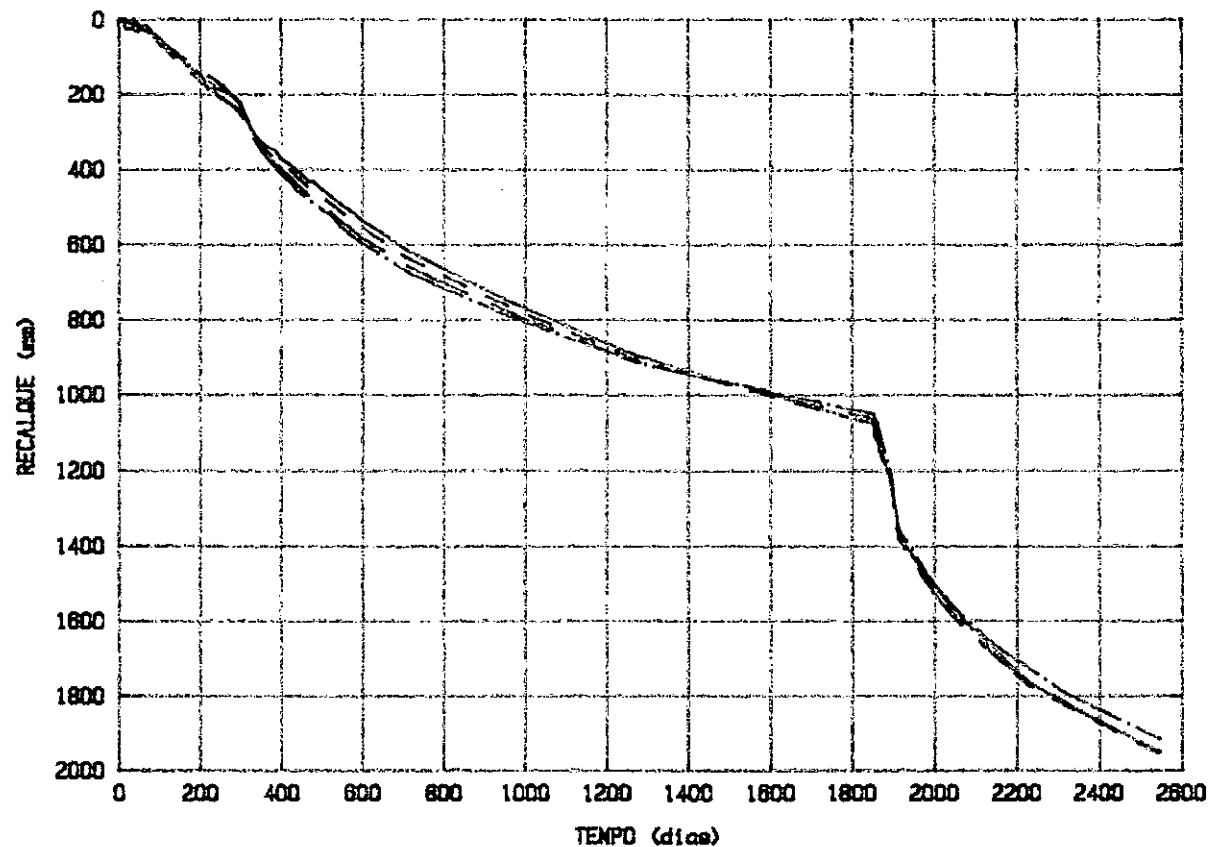


Aterro Experimental II

Gráfico: Recalque x Tempo

Data: 18/12/80 à 30/01/88

1a. e 2a. Etapas



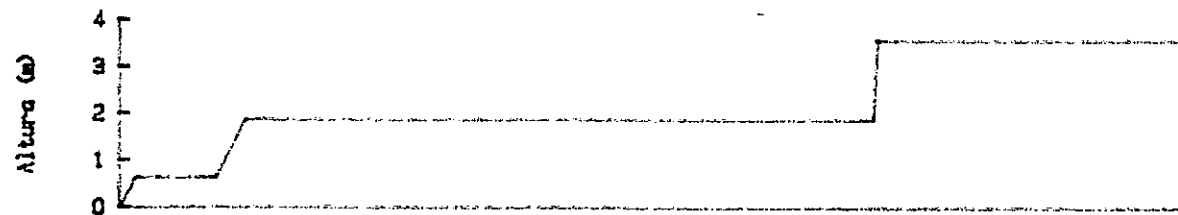
Padrão	Saço	Instrumento
—	C	Placa : R10
- - -	C	Placa : R11
— · —	C	Placa : R12
— · — · —	C	Placa : R3

Escala :

Ordenada ~ 1:20,0

Abcissa ~ 1:18,5

FIGURA A.11. CURVAS DE RECALQUE-TEMPO DAS PLACAS DE RECALQUE INSTALADAS AO LONGO DO EIXO LONGITUDINAL DO ATERRO.

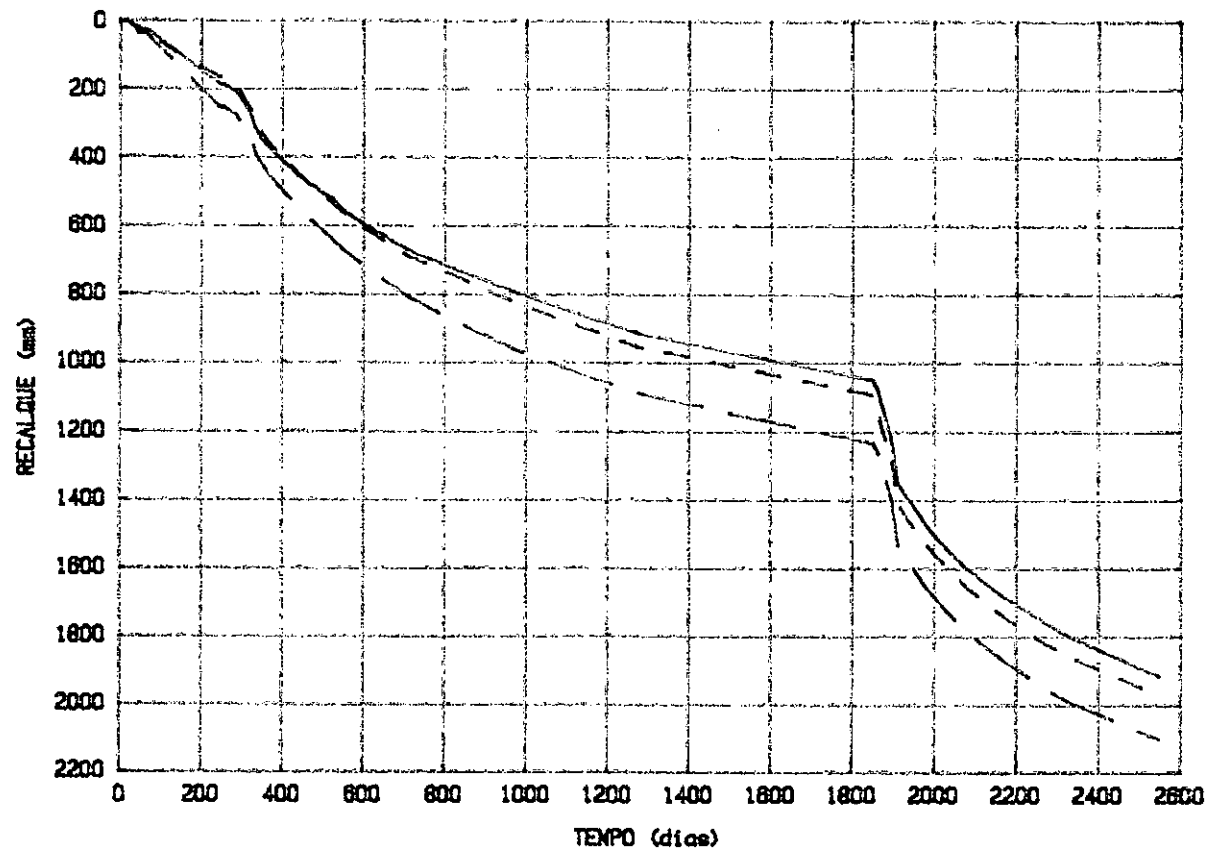


Aterro Experimental II

Gráfico: Recalque x Tempo

Data: 18/12/80 a 30/01/88

1a. e 2a. Etapas



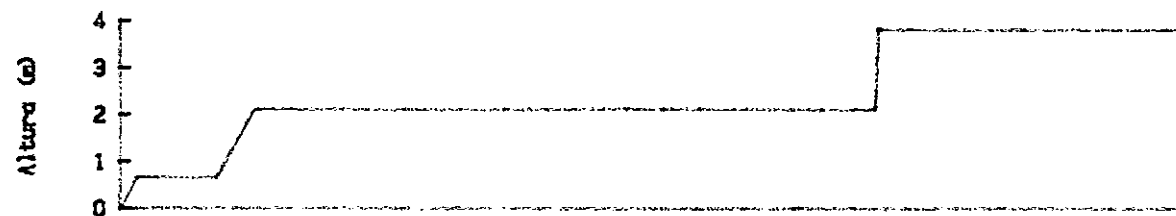
Padrão	Sigla	Instrumento
— — — — —	C	Placa : R3
- - - - -	C	Placa : R13
— — — — —	C	Placa : R14

Escala :

Ordenada → 1:22.0

Abcissa → 1:18.5

FIGURA A.12. CURVAS DE RECALQUE-TEMPO DAS PLACAS DE RECALQUE INSTALADAS AO LONGO DO EIXO LONGITUDINAL DO ATERRO.

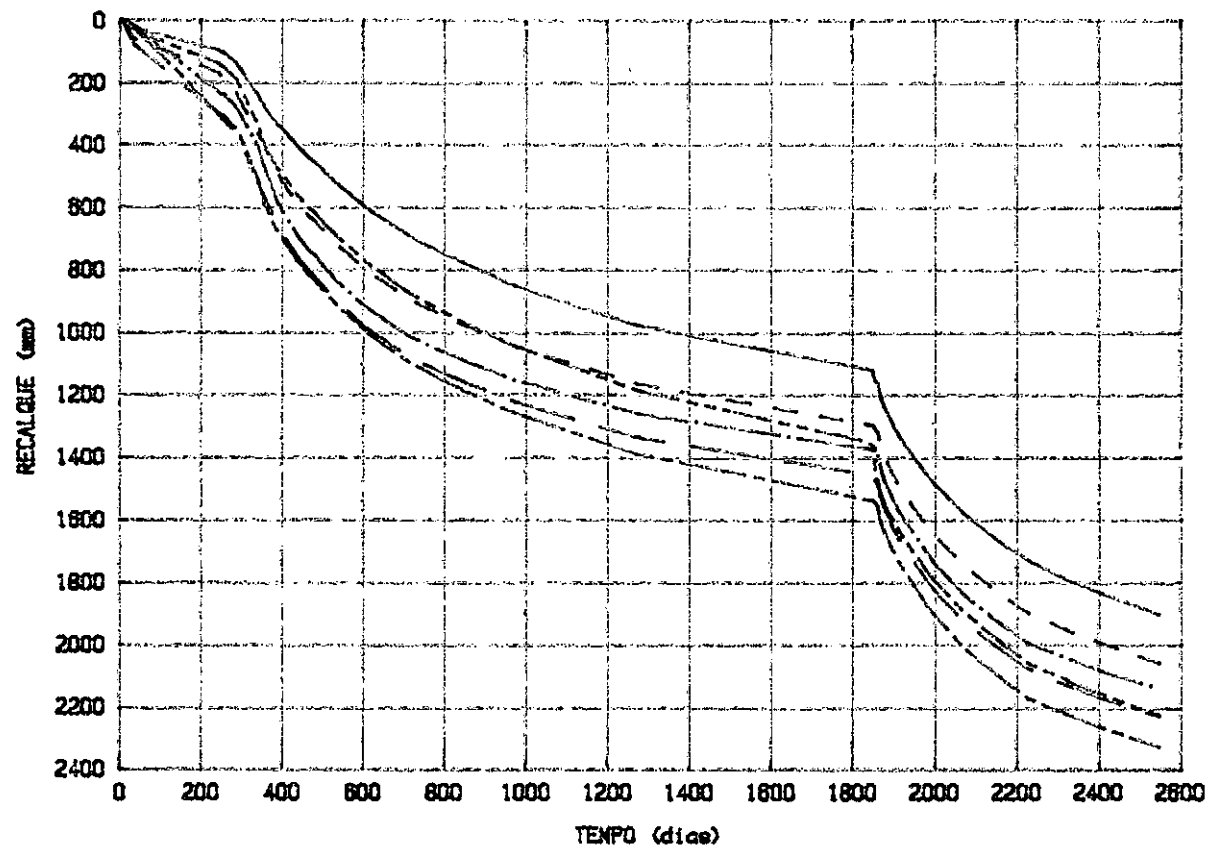


Aterro Experimental II

Gráficos: Recalque x Tempo

Data: 18/12/80 a 30/01/88

1a. e 2a. Etapas



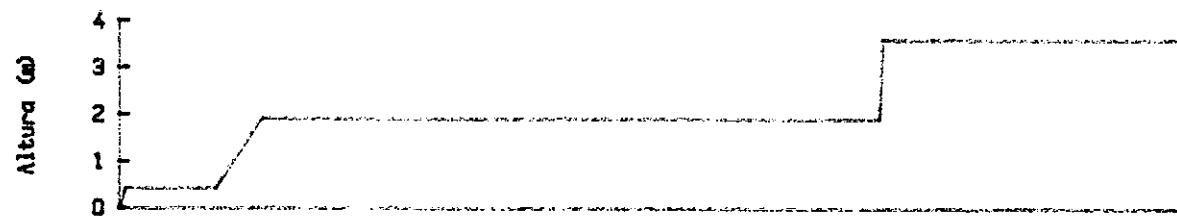
Padrão	Sigla	Instrumento
—————	D	Placa : R10
- - - - -	D	Placa : R11
—————	D	Placa : R12
—————	D	Placa : R3
- - - - -	D	Placa : R13
—————	D	Placa : R14

Escala :

Ordenada → 1:24.0

Abcissa → 1:18.5

FIGURA A.13. CURVAS DE RECALQUE-TEMPO DAS PLACAS DE RECALQUE INSTALADAS AO LONGO DO EIXO LONGITUDINAL DO ATERRO.

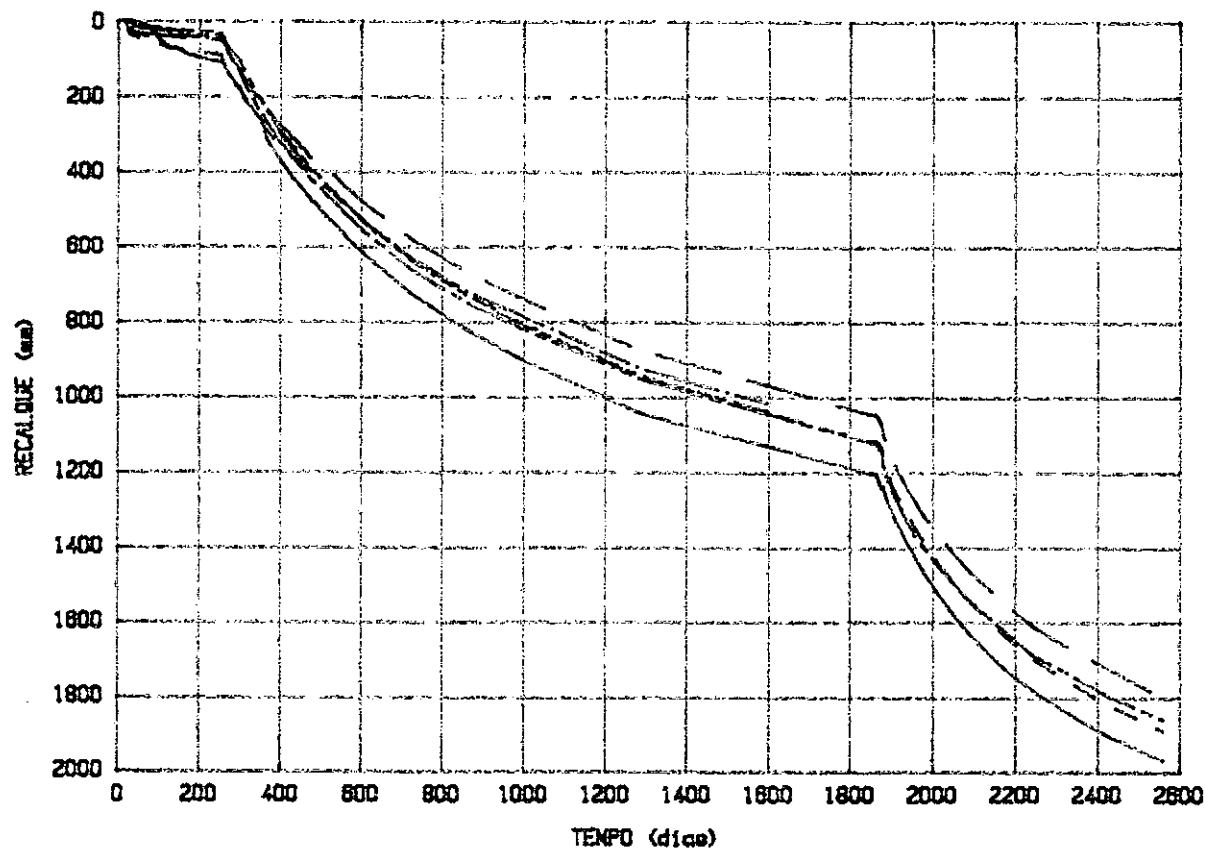


Aterro Experimental II

Gráficos: Recalque x Tempo

Data: 06/12/80 à 18/01/88

1a. e 2a. Etapas



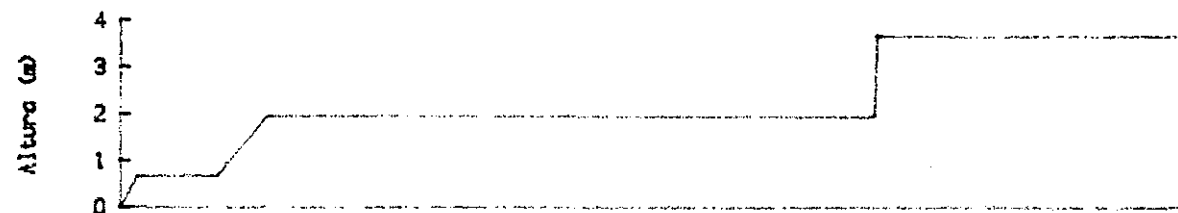
Padrão	Saço	Instrumento
—	E	Placa : R10
---	E	Placa : R11
- - -	E	Placa : R12
—	E	Placa : R3
---	E	Placa : R13
- - -	E	Placa : R14

Escala :

Ordenada - 1:20.0

Abcissa - 1:18.5

FIGURA A.14. CURVAS DE RECALQUE-TEMPO DAS PLACAS DE RECALQUE INSTALADAS AO LONGO DO EIXO LONGITUDINAL DO ATERRO.

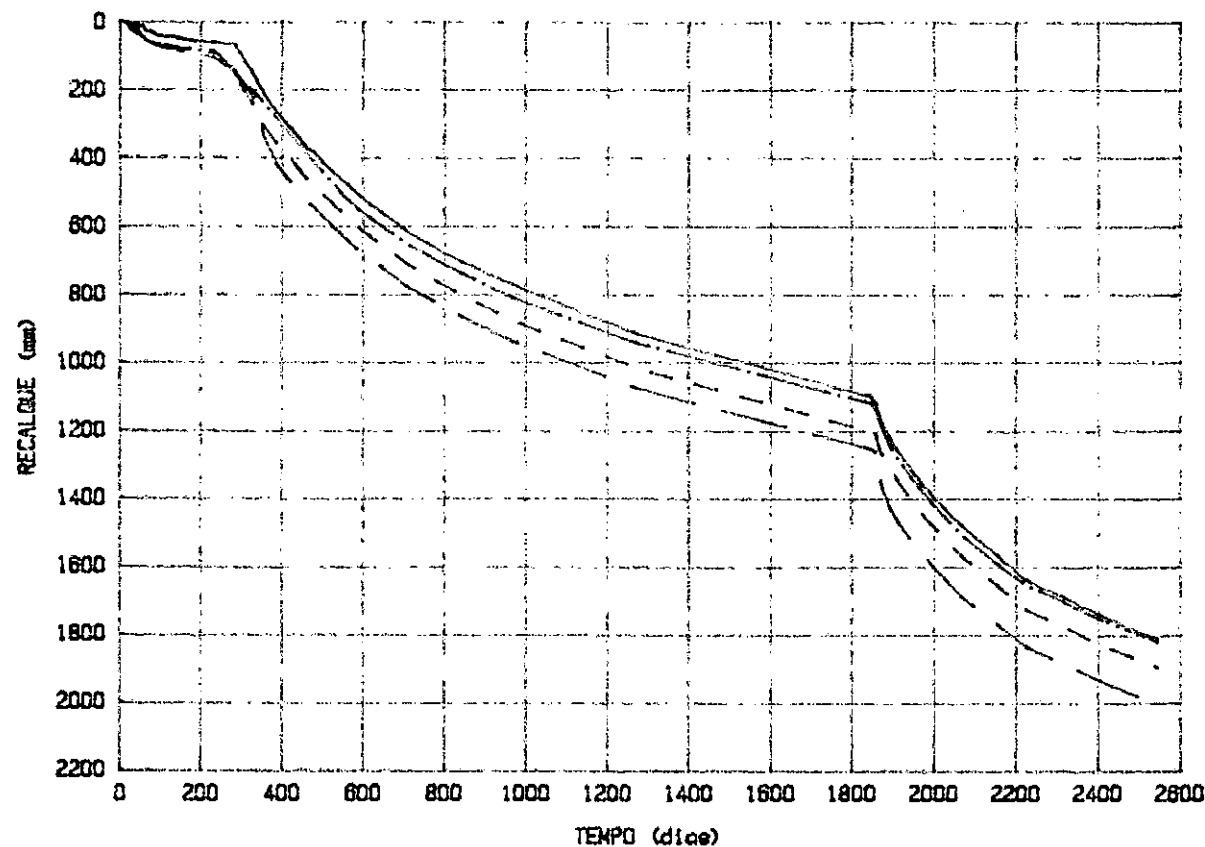


Aterro Experimental II

Gráfico: Recalque x Tempo

Data: 21/12/80 à 02/02/88

1a. e 2a. Etapas



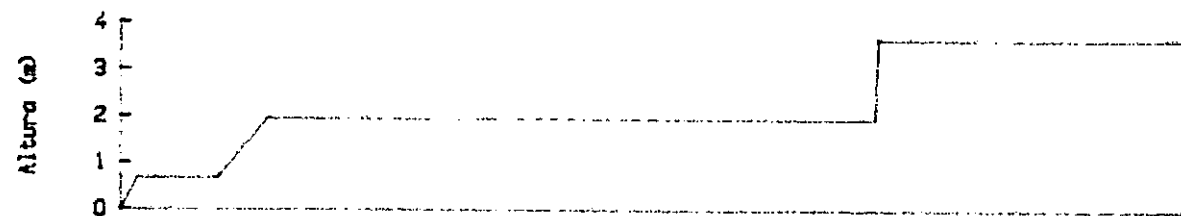
Padrão	Seção	Instrumento
—	F	Placa : R10
- - -	F	Placa : R11
— · —	F	Placa : R12
— · —	F	Placa : R3

Escala :

Ordenada → 1:22.0

Abcissa → 1:18.5

FIGURA A.15. CURVAS DE RECALQUE-TEMPO DAS PLACAS DE RECALQUE INSTALADAS AO LONGO DO EIXO LONGITUDINAL DO ATERRO.

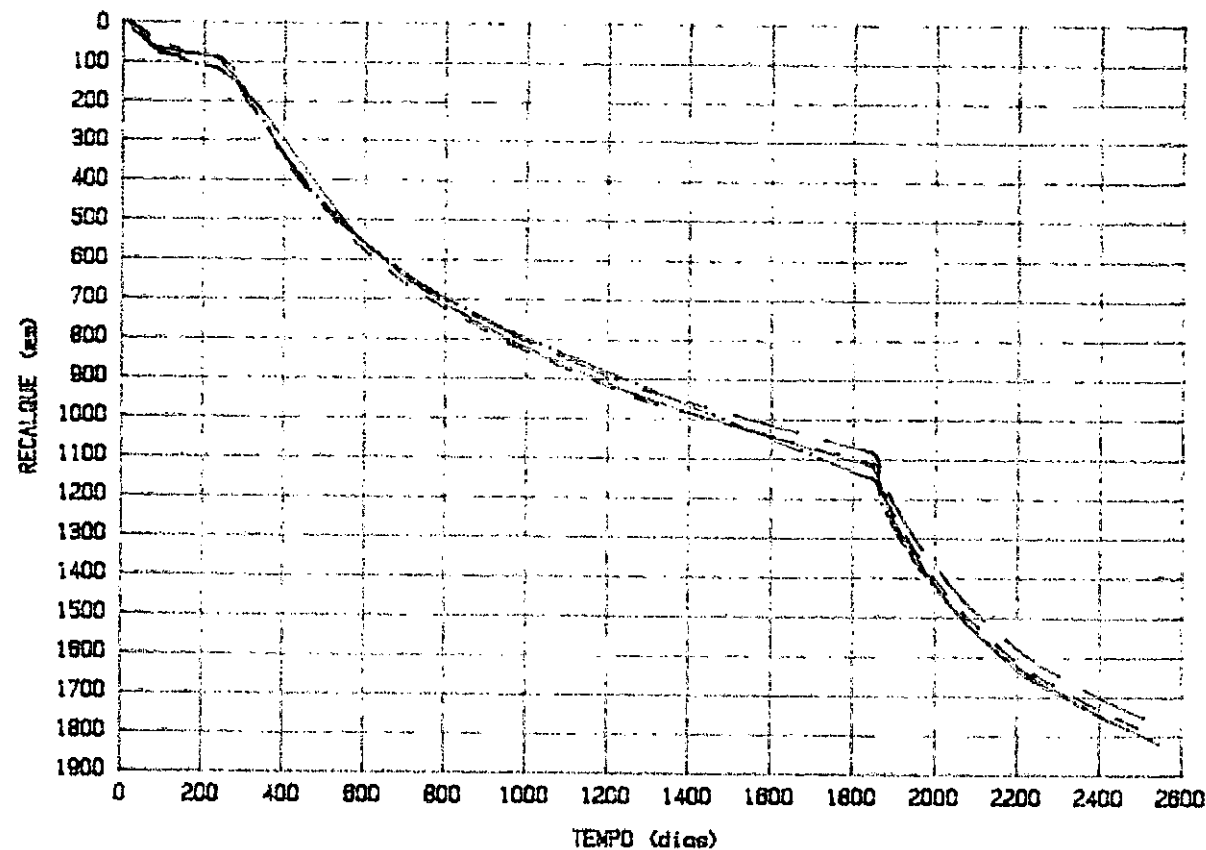


Aterro Experimental II

Gráfica: Recalque x Tempo

Data: 21/12/80 a 02/02/88

1a. e 2a. Etapas



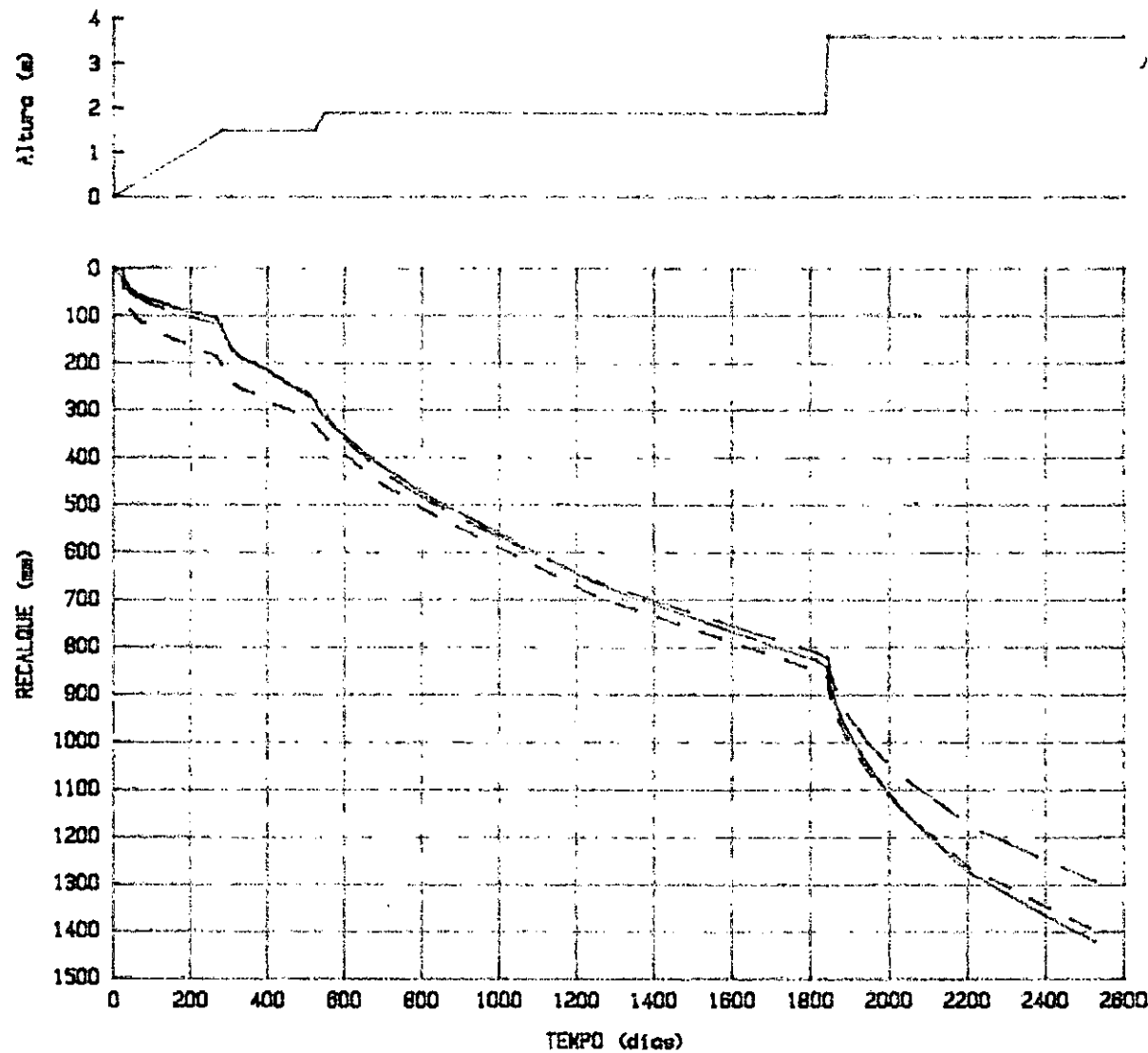
Padrão	Seção	Instrumento
—————	F	Placa : R3
- - - - -	F	Placa : R13
—————	F	Placa : R14
—————	F	Placa : R15

Escala :

Ordenada → 1:19.0

Abcissa → 1:18.5

FIGURA A.16. CURVAS DE RECALQUE-TEMPO DAS PLACAS DE RECALQUE INSTALADAS AO LONGO DO EIXO LONGITUDINAL DO ATERRO.



Aterro Experimental II

Gráfico: Recalque x Tempo

Data: 08/01/81 a 20/02/88

1a. e 2a. Etapas

Padrão	Seção	Instrumento
—	G	Placa : R11
- - -	G	Placa : R12
· · ·	G	Placa : R3

Escala :
 Ordenada → 1:15.0
 Abscissa → 1:18.5

FIGURA A.17. CURVAS DE RECALQUE-TEMPO DAS PLACAS DE RECALQUE INSTALADAS AO LONGO DO EIXO LONGITUDINAL DO ATERRO.

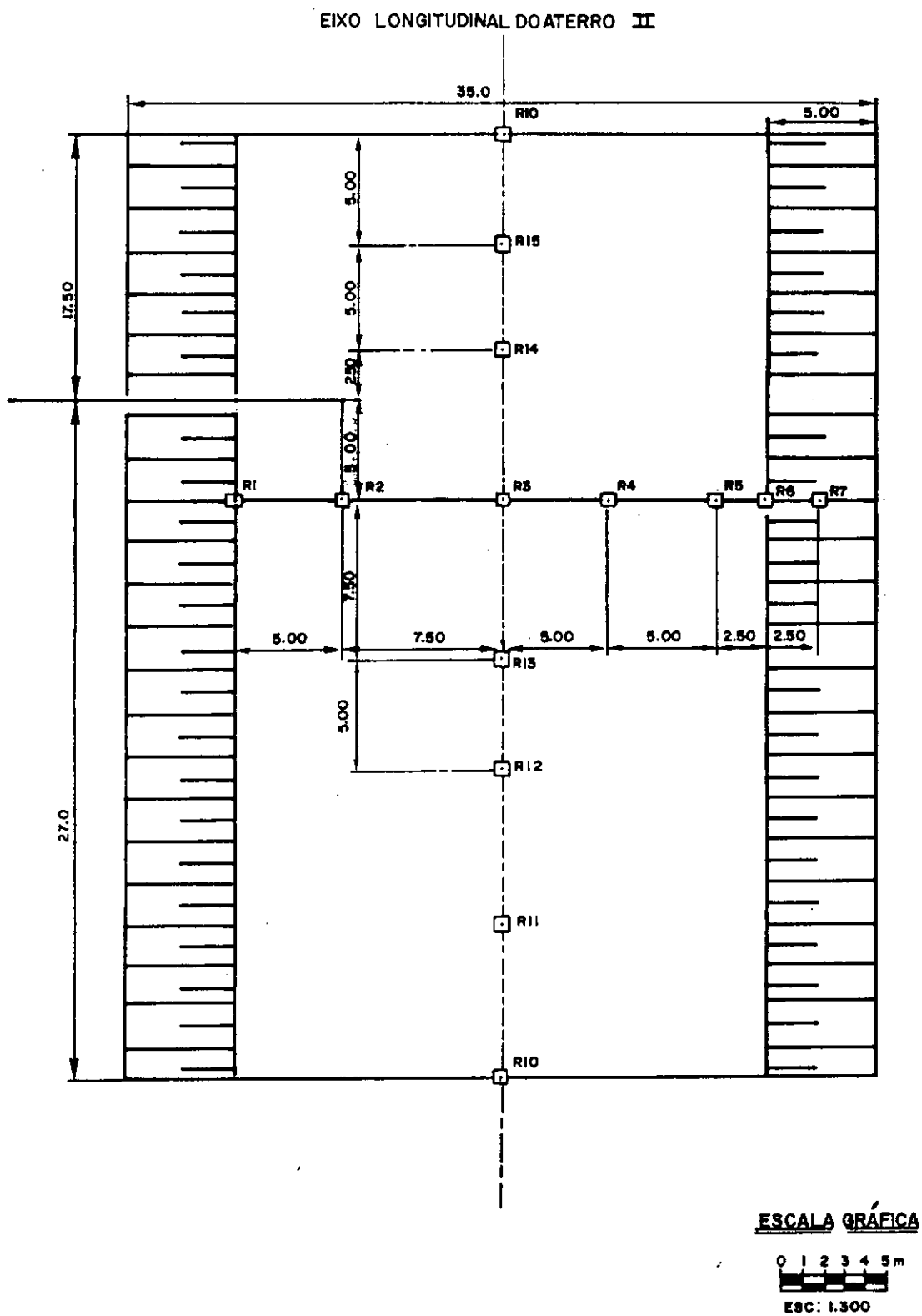


Figura A.18 Croqui típico da localização das placas de recalque nas seções A à G do Aterro

APÊNDICE B

PROGRAMA SARAPUÍ

B.1. INTRODUÇÃO

O PROGRAMA SARAPUÍ foi elaborado pelo técnico em computação Eliézio Batista de Oliveira com o apoio da COPPE/RJ e do IPR.

A idéia de elaborar este programa surgiu, no início deste trabalho, quando se sentiu a necessidade de reunir, em um arquivo de dados, todas as medições dos instrumentos instalados no Aterro Experimental II, com a finalidade de uma análise mais precisa.

B.2. O PROGRAMA

O PROGRAMA SARAPUÍ foi escrito em linguagem PASCAL sendo utilizado em microcomputador PC/XT - compatível, marca MONYDATA com impressora Emília PC, marca ELEBRA e ploter marca HEWLETT PACKARD, modelo HP-7090A. A fonte do programa possui 4500 linhas e o código executável é de 58 K bytes.

Os objetivos do programa são:

- 1º. Arquivar os dados obtidos através das medições realizadas nos instrumentos de campo através de uma planilha;

29. Imprimir os dados arquivados para elaboração de relatórios de dados;
39. Analisar os dados arquivados através de gráficos e tabelas geradas pelo programa.

As medições que se encontram implantadas no programa são dos seguintes instrumentos: placas de recalque, extensômetro magnético vertical, piezômetro Casagrande e piezômetro hidráulico. A planilha para a entrada de dados obtidos através do inclinômetro ainda não foi elaborada.

Tendo em vista a dimensão e complexidade do programa este foi subdividido em dez módulos, cada um com subrotinas que facilitam o desenvolvimento dos trabalhos a serem realizados com o mesmo. Os módulos do programa são:

1. CHARDEF.SRP: define as constantes que serão utilizadas nos demais módulos;
2. TYPEDEF.SRP: define tipos das variáveis utilizadas nos módulos gráficos descritos adiante;
3. NUCLEO.SRP: contém procedimentos básicos tais como rotinas de acesso ao vídeo, rotinas de impressão, manipulação de datas (conversão do formato dia/mês/ano em calendário serial), etc;
4. MANDATA.SRP: contém os procedimentos responsáveis pela manipulação direta dos arquivos de dados;

que se deseja observar e a escala do tempo (t , $\log T$ e \sqrt{t})

1.2. curva de recalque ao longo de uma seção transversal

1.3. curva de recalque ao longo de uma seção longitudinal

2. Análise do extensômetro magnético vertical:

2.1. curvas de recalque ao longo do tempo e dado conforme des
crição no item 1.1.

2.2. curvas de recalque ao longo de uma seção transversal.

2.3. curvas de recalque ao longo de uma seção longitudinal

2.4. curva de recalque ao longo da profundidade da camada de ar
gila; esta análise necessita também do número do instru
mento que se deseja observar.

3. Análise do piezômetro Casagrande:

3.1. curvas de poro-pressão ao longo do tempo; esta análise ne
cessita do número do instruemnto que se deseja observar

3.2. curvas de poro-pressão ao longo de uma seção transversal

3.3. curvas de poro-pressão ao longo de uma seção longitudinal

3.4. curvas de poro-pressão ao longo da profundidade da camada
de argila; esta análise necessita do número do instrumento
que se deseja observar.

4. Análise do piezômetro hidráulico; idem ao item 3.

5. GRAPHIX.SRP: é um módulo gráfico, contém os procedimentos gráficos para traçado de retas, curvas, eixos, escalas, etc, no vídeo e cópia para a impressora;
6. PLOTTER.SRP: é um módulo gráfico, contém os procedimentos gráficos para traçado de retas, curvas, eixos, escalas, etc, no ploter.
7. ENTRADA.SRP: contém as rotinas responsáveis pela geração da planilha para cada instrumento e rotinas para aquisição de dados via teclado;
8. IMPRIME.SRP: é uma biblioteca de procedimentos para geração de relatórios do arquivo de dados.
9. ANALISE.SRP: é o maior e mais importante módulo do programa porque contém todas as rotinas responsáveis pela geração de gráficos e tabelas, permitindo a análise dos dados;
10. SARAPUÍ.PAS: contém a rotina principal que dá acesso aos demais módulos.

As possíveis análises realizadas no programa contidas, através de subrotinas no módulo 9, necessitam como entrada de dados o tipo do instrumento e a seção que serão analisadas além do período que se deseja observar. Estas análises podem ser resumidas em:

1. Análise das placas de recalque
 - 1.1. curvas de recalque ao longo do tempo; esta análise necessita também como dado de entrada o número do instrumento

APÊNDICE C

PROGRAMA ASAOKA

C.1. INTRODUÇÃO

O PROGRAMA ASAOKA foi elaborada pelo técnico em Computação Eliézio Batista de Oliveira com o apoio da COPPE/RJ e do IPR.

Este programa foi feito com o objetivo de se estudar a influência da escolha de um Δt nos resultados de coeficientes de adensamento e recalques finais calculados pelos Métodos de ASAOKA e ASAOKA modificado por MAGNAN e DEROY.

C.2. O PROGRAMA

O PROGRAMA ASAOKA foi elaborado em linguagem PASCAL sendo utilizado no mesmo equipamento do PROGRAMA SARAPUI.

Os dados necessários à execução do programa são os arquivos de dados gerados pelo "Programa Sarapuí".

O programa, através de interpolação dos dados do arquivo de dados, lista os valores de $s_{n+1}(t)$ e $s_n(t)$ de acordo com o Δt arbitrado no início da análise. Estes valores são plotados em um gráfico $s_{n+1}(t) \times s_n(t)$ e por eles traçada uma reta através do método dos mínimos quadrados, testando-se a correlação ponto a ponto. Caso, a correlação seja inferior à 0,999 o

primeiro ponto do gráfico acima descrito é abandonado. O proce
so é realizado até se atingir a correlação desejada.

Os cálculos de c_v , c_h e s_f obedecem ao procedimen
to descrito no capítulo III do presente trabalho.

A listagem do PROGRAMA ASAOKA é apresentada a se
guir.

PROGRAMA ASAOKA

```
($I TypeDef.Sys)
```

```
const MaxEstagios = 5;
      Ordem       = 3;
      TimeCNV      = 86400.0;
      LongCNV      = 0.1;
```

```
type TpSecao      = 'A'..'G';
```

```
      TpEstagio   = Array [TpSecao,1..MaxEstagios] Of Record
```

```
  tInicial,
```

```
      tFinal,
      Dh
```

```
  : Integer;
```

```
End;
```

```
      Alfa40      = string[40];
```

```
var Secao          : char;      ( .....Secao
do aterro )
      Dreno        : string [5]; ( .....Ha' drenos
(sim/nao) )
      Rotulo        : Alfa40;   ( .....Rotulo
do grafico )
      NumPts        : integer;   ( .....Numero
de pontos )
      X,            : .....Abscissa
(tempo) e )
      Y             : PlotVector; ( .....ordenada
(recalque) )
      A,B,R         : Real;      ( .....Coeficientes linear,
angular e
.....de
correlacao )
      XYArray       : PlotArray absolute X;
```

```
      Delta         : integer;   (
.....Intervalo de tempo )
      Hd            : real;      ( .....Altura
do deposito )
      Re            : real;      ( .....Raio de
influencia do dreno )
      Rw            : real;      ( .....Raio
efetivo do dreno )
      n             : real;      ( (Raio de influencia)/
(Raio efetivo) )
      E             : real;      ( .....Espacamento entre
os drenos )
.....( Coeficientes de adensamento
vertical, )
      Cv,Ch         : real;      ( .....radial e
combinado )
      S0            : real;      (
.....Recalque imediato )
      Sf            : real;      (
.....Recalque final )
```

```

Device      : Text;      (
.....Periferico de saída )
DeviceCode  : Char;
i           : Integer;    (
.....Contador )
prm         : Byte;      ( .....Parametro a ser
analizado )

```

```

($I Graphix.Sys )
($I Kernel.Sys )
($I FindWrld.Hgh)
($I Axis.Hgh )
($I Polygon.Hgh )
($I Spline.Hgh )
($I Math.Inc )

```

```
Procedure VerificaNumeroDeParametros;
```

```
Begin
```

```
  If (ParamCount < 3) Then
```

```
    Begin
```

```
      WriteLn ('Numero de parametros incorreto');
```

```
      Halt;
```

```
    End;
```

```
End;
```

```
Procedure EscolheSaida;
```

```
Var Ch : Char;
```

```
Begin
```

```
  Ch := ParamStr (1);
```

```
  DeviceCode := UpCase (Ch);
```

```
  If (DeviceCode <> 'I') Then Assign (Device, 'Con:');
```

```
  Else Assign (Device, 'Lst:');
```

```
End;
```

```
Procedure EscolheDelta;
```

```
Var Codigo : Integer;
```

```
Begin
```

```
  Val (ParamStr (2), Delta, Codigo);
```

```
  If ((Codigo <> 0) Or (Delta < 0)) Then
```

```
    Begin
```

```
      WriteLn ('Delta ('+ParamStr (2)+' ) invalido');
```

```
      Halt;
```

```
    End;
```

```
End;
```

```
procedure Inicializa;
```

```
begin
```

```
  VerificaNumeroDeParametros;
```

```
  InitGraphic;
```

```
  ClrScr;
```

```
  EscolheSaida;
```

```
  EscolheDelta;
```

```
  DefineWindow (3, 6, 20, 75, 180);
```

```
  DefineWindow (4, 6, 20, 79, 89);
```

```
  DefineWindow (5, 6, 109, 79, 180);
```

```
end;
```

```
procedure LePontos (prm : integer);
```

```
var Nome : string [12];
```

```

ArqDados := text [1000];
i,j      := integer;

begin
  Nome := 'SETTLE.' + ParamStr (prm);
  assign (ArqDados, Nome);
  ($i-) reset (ArqDados); ($i+)
  if (IOResult (>) 0) then
    begin
      writeln ('ArqDados ' + Nome + ' inexistente');
      halt;
    end;
  readln (ArqDados, Secao);
  readln (ArqDados, Dreno);
  readln (ArqDados, Rotulo);
  if (Dreno = 'sim') then
    begin
      readln (ArqDados, E);
      readln (ArqDados, Rw);
      Re := E / Sqrt (pi);
      n  := Re / Rw;
    end;
  readln (ArqDados, Hd);
  readln (ArqDados, NumPts);
  j := 1;
  for i := 1 to NumPts do
    begin
      readln (ArqDados, XC[j], YC[j]);
      if (i > 1) then
        begin
          XC[j] := XC[j] - XC[1];
          if (XC[j] = XC[j-1]) then
            j := j - 1;
          end;
          j := j + 1;
        end;
      XC[1] := 0;
      NumPts := j - 1;
      close (ArqDados);
    end;

procedure Imprime;
begin
  Writeln (Device, 'Secao : ' + Secao);
  Writeln (Device, Rotulo);
  Writeln (Device, 'Tempo Recalque');
  for i := 1 to NumPts do
    writeln (Device, XC[i]:6:1, YC[i]:10:2);
end;

function Fn := real;
var n2 := real;
begin
  n2 := n * n;
  Fn := n2 / (n2 - 1) * ln (n) - (3 * n2 - 1) / (4 * n2)
end;

Procedure TracaReta (A,B      := Real;
                    LineStyle := Integer);

```

```

Var   LineStyleLoc  : Integer;
      DirectModeLoc  : Boolean;
      ClippingLoc    : Boolean;
Begin
  DirectModeLoc := DirectModeGlb;
  ClippingLoc   := ClippingGlb;
  LineStyleLoc  := LineStyleGlb;
  SetWindowModeOn;
  SetClippingOn;
  SetLineStyle (LineStyle);
  DrawLine (X1WldGlb, X1WldGlb*B+A, X2WldGlb, X2WldGlb*B+A);
  SetLineStyle (LineStyleLoc);
  ClippingGlb   := ClippingLoc;
  DirectModeGlb := DirectModeLoc;
End;
```

```

Procedure FazGrafico (win      : integer;
                     Var X,Y : PlotVector;
                     NumPts,
                     Quadrante,
                     Code      : Integer);
```

```

Begin
  EnterGraphic;
  SelectWindow (2);
  DrawBorder;

  SelectWindow (win);
  DrawAxis (8,8,1,1,Quadrante,True);
  DrawPolygon (X,Y,1,NumPts,Code,1,0);

  With WindowEwin Do
    DefineWindow (1,x2-17,y2-34,x2,y2-7);
    SelectWindow (1);
    ClearWindow;
    DrawBorder;
    GotoXY (64,20);   Write ('Secao '+Secao);
    GotoXY (63,21);   Write (Rotulo);
    SelectWindow (win);
  End;
```

```

procedure EsperaComando;
var   Ch : Char;
begin
  if (DeviceCode = 'I') then
    HardCopy (false)
  else
    repeat
      read (kbd, Ch);
    until (Ch = ^M);
    ClearScreen;
    LeaveGraphic;
  end;
```

```

( ***** )
***** )
```

```

( *
*)
```

```

(*)                               Metodo de ASAOKA
*)
(*)                               Modificado por Magnan & Deroy
*)
(*)
(***)
(***)

procedure Asaoka;
var  Sj, Sjm1 : PlotVector;
     N        : integer;
     Cvm, Chm : real;
     d        : real;
begin
  N := NumPts-1;
  Sjm1 := Y;
  move (Sjm1[2], Sj, SizeOf (real) * N);

  MinimosQuadrados (Sjm1, Sj, N, A, B, R);
  DefineWorld (1, Sjm1[1], Sjm1[1], SJC[N], SJC[N]);
  SelectWorld (1);
  FazGrafico (3, Sjm1, Sj, N, -1, -1);

(*)
  TracaReta (0, 1, 2);      ( Bissetriz do quadrante )
  TracaReta (A, B, 3);

*)

  EsperaComando;

  A := A * LongCNU;
  d := Delta * TimeCNU;
  Sf := A / (1 - B);

  Imprime;
  writeln (Device);
  writeln (Device, 'Resultados :');      writeln (Device);
  writeln (Device, 'Coeficiente angular ... ', B:6:4);
  writeln (Device, 'Coeficiente linear .... ', A:6:3);
  writeln (Device, 'Correlacao ..... ', R:6:4);
  writeln (Device);
  writeln (Device, 'Recalque final ..... ', Sf:8:3);
  if (Dreno = 'nao') then
    begin
      Cv := - 5 / 12 * Hd * Hd * ln (B) / d;
      Cvm := 48 / (5 * pi * pi) * Cv;
      writeln (Device, 'Cv (Asaoka) ..... ', Cv:8);
      writeln (Device, 'Cv (Magnan & Deroy) ... ', Cvm:8);
    end
  else
    begin
      Chm := - Fn / 2 * Re * Re * ln (B) / d;
      writeln (Device, 'Ch (Magnan & Deroy) ... ', Chm:8);
      writeln (Device, 'F(n) ..... ', Fn:8);
    end;
  if (DeviceCode = 'I') then
    write (Device, ^L);
end;

```

```
Begin
  Inicializa;
  For prm := 3 To ParamCount Do
    Begin
      LePontos (prm);
      Spline (XYArray, NumPts, Delta, XYArray, NumPts);
      Asaoka;
    End;
  End.
```